

# 國立交通大學

工學院產業安全與防災學程

碩 士 論 文

矽甲烷槽車供應安全評估

The security assessment for silane trailer supply

研 究 生：熊 淑 珍

指 導 教 授：張 翼 教 授

謝 明 宏 副 教 授

中 華 民 國 101 年 9 月

# 矽甲烷槽車供應安全評估

The security assessment for silane trailer supply

研究生：熊淑珍

Student：Shu-Chen Hsiun

指導教授：張翼

Advisor：Edward Yi Chang

謝明宏

Ming-Hong Hsieh

國立交通大學

工學院產業安全與防災學程

碩士論文

A Thesis

Submitted to Degree Program of Industrial Safety and Risk Management

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

In

Industrial Safety and Risk Management

September 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 101 年 9 月

# 矽甲烷槽車供應安全評估

學生：熊淑珍

指導教授：張 翼  
謝明宏

國立交通大學工學院產業安全與防災學程

## 摘 要

矽甲烷( $\text{SiH}_4$ )氣體近年來廣泛的應用在半導體、光電及太陽能產業，是這些產業的製程中相當重要的生產原料。然而，矽甲烷氣體具有與空氣接觸會自燃、易爆等特性，並且燃燒時會釋放出未結晶的二氧化矽濃煙。若製程進行時或運送過程中發生洩漏或防護失效等情形，除了可能導致環境污染外，更會損壞光半廠中昂貴的設備，嚴重時可能造成人員傷亡或火災爆炸，是不可忽視的重要議題。TFT-LCD 廠的矽甲烷使用量是半導體廠的倍數，因此 TFT-LCD 廠的矽甲烷氣體槽車的安全評估為相當重要的環節。

本論文以矽甲烷自燃濃度是否超過最低爆炸濃度以及是否低於臨界流速，做為矽甲烷氣體槽車安全設計之考量。並且本論文分析了槽車置放環境的狀況，並評估了在不同置放環境下的安全性。本研究並評估了矽甲烷槽車作業的安全性，並分析了槽車作業防災策略、槽車安全設計與管理以及槽車置放與裝載，對於矽甲烷的槽車供應的安全評估做出極為詳盡的評估與分析。

**關鍵字：**矽甲烷，TFT-LCD，槽車作業，槽車安全，防災策略

# The security assessment for silane trailer supply

student : Shu-Chen Hsiung

Advisors : Dr. Edward Yi Chang

Dr. Ming-Hong Hsieh

Degree Program of Industrial Safety and Risk Management

College of Engineering

National Chiao Tung University

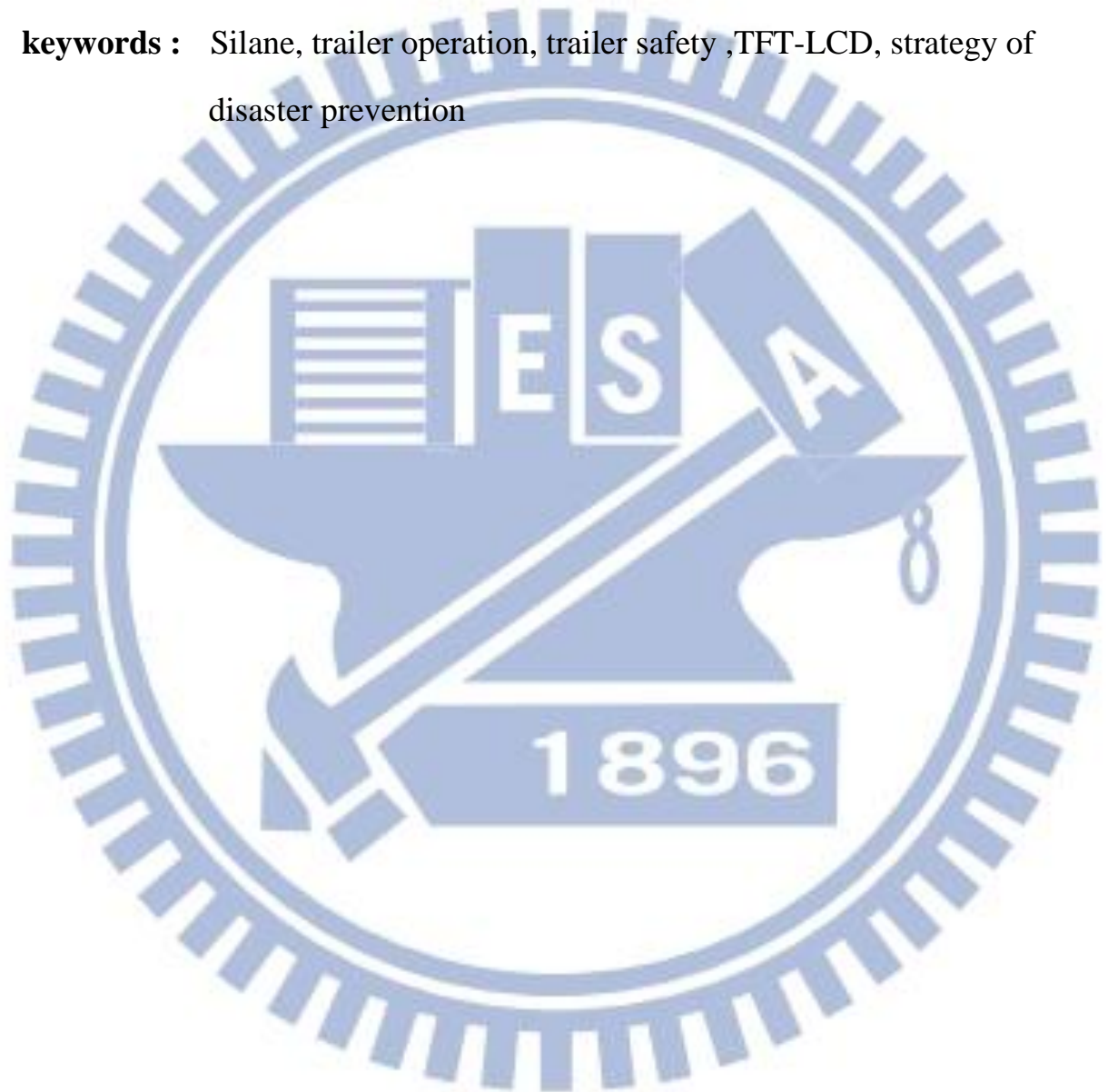
## ABSTRACT

In recent years, silane ( $\text{SiH}_4$ ) gas is one of important raw materials for semiconductor, electro-optical, and solar energy industries. However, the silane gas ignites spontaneously when exposed to air and explosive easily. It also releases the smoke of uncrystallized silica when it ignites. When leakage or protection failure occurs during the delivery process, it will damage the facilities of factory, and leads to the environmental pollution. It may also cause the injuries or fire explosion in severe cases. The usage of silane in TFT-LCD factory is for more than that in semiconductor factory, therefore it is a important issue to evaluate the safety of silane gas trailer.

This thesis studies the safety of silane gas trailer by the cases of whether the spontaneous combustion concentration of silane is more than minimum explosive concentration and lower than critical flow velocity. The condition of parking environment of trailer and the security in the different parking

environments are also evaluated. This study also investigates the operation security of silane trailer and analyzes the strategy of disaster prevention of operation, the safety management devise and parking and loading of trailer.

**keywords :** Silane, trailer operation, trailer safety ,TFT-LCD, strategy of disaster prevention



## 誌 謝

用了一千多個日子才完成論文，感謝這些年指導教授張 翼博士、謝明宏博士的辛苦指導，與口試審議委員謝宗雍博士、張 立博士對論文的細心指導與提供寶貴的建議。

在研究所求學的日子裡，感謝學長、學姊與同學們對研究上的幫助。更感謝家人的陪伴與鼓勵，終於在努力多年後拿到碩士學位。

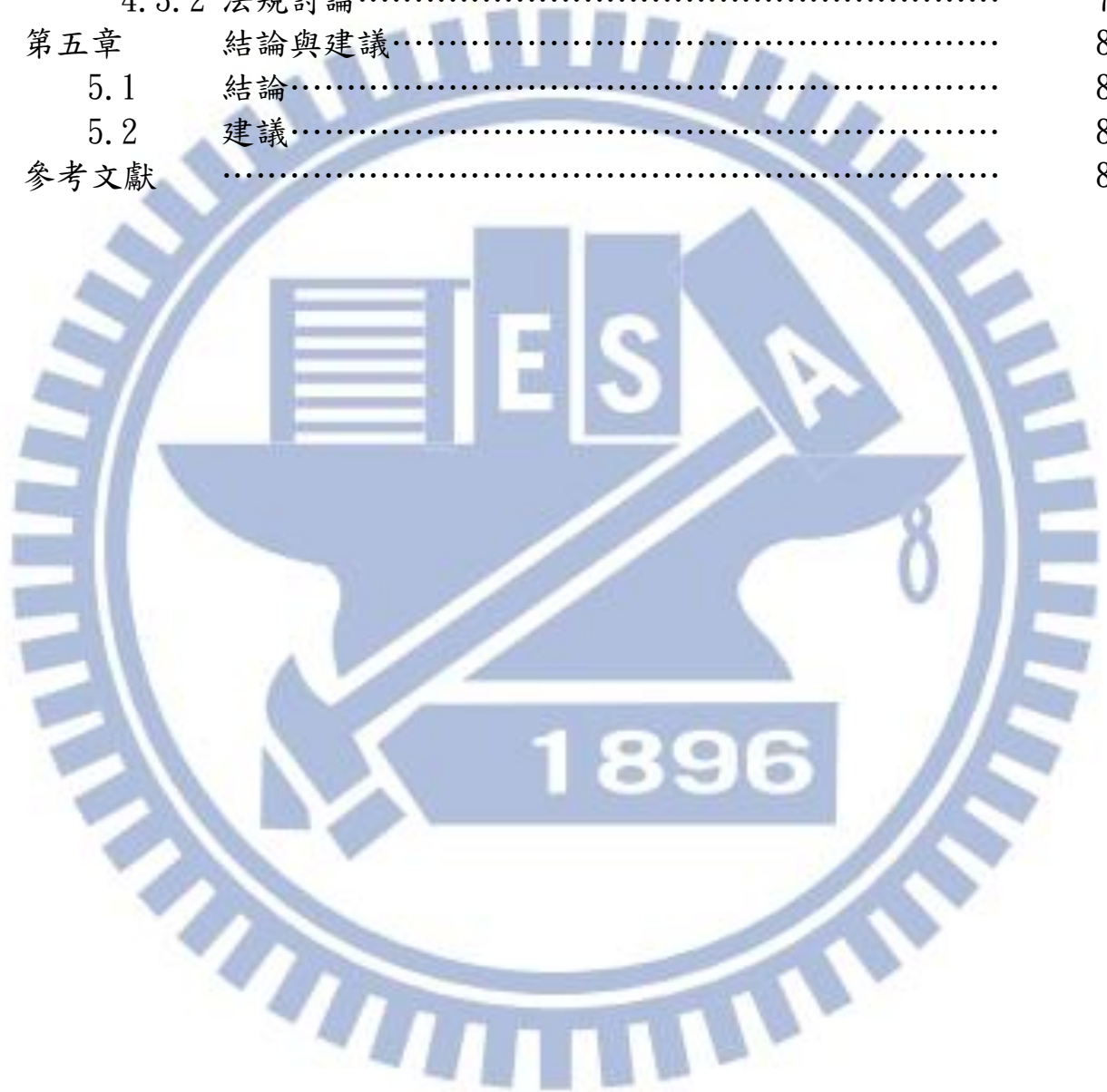
學習是無止境的。在獲得碩士學位後，仍將繼續提昇個人的專業能力。也會隨社會進步的腳步不斷的學習與進步，並將個人所學回饋社會。



# 目 錄

中文提要	.....	i
英文提要	.....	ii
誌謝	.....	iv
目錄	.....	v
表目錄	.....	vii
圖目錄	.....	viii
第一章	緒論.....	1
1.1	研究動機.....	1
1.2	文獻回顧.....	2
1.3	研究目的.....	4
第二章	主體研究.....	5
2.1	研究主體.....	5
2.2	分析範圍探討.....	11
2.2.1	矽甲烷燃燒原理.....	11
2.2.2	矽甲烷開放空間之安全防護.....	14
2.3	基本資料.....	21
2.3.1	矽甲烷基本物理化學特性資料.....	21
2.4	矽甲烷在產業上的應用.....	24
2.4.1	矽甲烷在產業上的應用角色.....	24
2.4.2	矽甲烷在光電產業上的重要性與風險.....	24
2.4.3	矽甲烷在 TFT-LCD 的應用.....	25
2.4.4	矽甲烷目前之存放方式.....	28
2.5	研究流程圖.....	30
第三章	矽甲烷拖車供應系統之防災與安全評估.....	31
3.1	矽甲烷配送系統安全設計.....	32
3.1.1	危害與可操作性分析.....	32
3.1.2	矽甲烷配送系統設計.....	33
3.1.3	矽甲烷 ISO Trailer 容器之認.....	35
3.1.4	典型矽甲烷 Trailer 容器規格.....	36
3.2	大型矽甲烷供應系統需求.....	38
3.2.1	矽甲烷安全測試研究介紹.....	40
3.2.2	矽甲烷供應系統優缺點比較.....	43
3.2.3	鋼瓶與拖車系統安全防護措施比較.....	44
3.2.4	由拖車大量洩漏之 FTA 分析結果.....	45
第四章	結果與分析.....	56
4.1	矽甲烷槽車作業.....	56

4.2	矽甲烷槽車作業防災策略.....	58
4.2.1	槽車安全設計.....	59
4.2.2	槽車安全裝置.....	62
4.2.3	槽車安全管理.....	70
4.3	矽甲烷運送規範法規分析.....	74
4.3.1	法規分析.....	75
4.3.2	法規討論.....	78
第五章	結論與建議.....	80
5.1	結論.....	80
5.2	建議.....	81
參考文獻	.....	82





## 圖 目 錄

圖 1	半穩定狀態下矽甲烷的反應特性.....	10
圖 2	利用不同管徑之系統測試矽甲烷之外洩危害.....	13
圖 3	不同管徑下矽甲烷爆炸時溫度與流速之關係.....	13
圖 4	矽甲烷工安危害事件(一)洩漏起火點源.....	15
圖 5	矽甲烷工安危害事件(二)災害現場.....	15
圖 6	矽甲烷工安危害事件(三)現場滅火.....	16
圖 7	TFT-LCD 製程中使用的危害物與有害物.....	27
圖 8	450 公升 Y 型鋼瓶暫存區.....	28
圖 9	拖車暫存區.....	29
圖 10	露天鋼瓶暫存區.....	29
圖 11	研究流程圖.....	30
圖 12	化學槽車示意圖.....	31
圖 13	典型的大宗系統製程流程圖.....	32
圖 14	與槽車等效之矽甲烷包裝.....	33
圖 15	矽甲烷 ISO 規格貨櫃容器之各部名稱.....	33
圖 16	矽甲烷 ISO 規格貨櫃容器與裝置之各部名稱.....	34
圖 17	矽甲烷槽車之輸送歧管裝置.....	35
圖 18	ISO 之矽甲烷槽車規範.....	36
圖 19	拖車大量洩漏之 FTA 分析.....	52
圖 20	不同排放口徑之立即引燃的引燃位置與矽甲烷流速的關係.....	58
圖 21	槽體安全裝置裝設位置及構造圖.....	65
圖 22	車用安全連結器設計簡圖(一).....	66
圖 23	車用安全連結器設計簡圖(二).....	66
圖 24	槽車安全管理系統架構圖.....	72

## 表 目 錄

表 1	製程各階段之危害分析方法.....	8
表 2	矽甲烷燃燒濃度範圍.....	11
表 3	矽甲烷物理化學特性.....	22
表 4	矽甲烷槽車規格.....	36
表 5	矽甲烷供應系統優缺點比較.....	43
表 6	鋼瓶與拖車系統安全防護措施比較.....	44
表 7	矽甲烷供應系統危害因素與預防建議.....	49
表 8	SEMATECH 對矽甲烷鋼瓶與大量矽甲烷拖車比較.....	54
表 9	槽體安全裝置之種類、型式、功能及用途彙整表.....	64
表 10	矽甲烷儲存及處理國內外規範.....	74



# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機

1970 及 1980 年代，IBM/HRC，Union Carbide 及 San Diego State 對矽甲烷(Silane； $\text{SiH}_4$ )作過研究 90 年代，更有 FM/SEMATECH，Intel，CGA 或其他機構(如日本)對矽甲烷做更多的研究。長久以來矽甲烷被半導體業視為頭號危險物質，除了其自燃的危險外，氣瓶櫃爆炸更威脅到人生安全及財物安全。

TFT-LCD 是繼半導體產業後成為我國高科技產業目前最主要的科技工業。為提昇在國際市場的競爭力及產能，從第 3.5 代、第 4 代、第 5 代、第 6 代，發展至現有的第 7 代，甚至 8 代以上，其因生產設備大型化、自動化，廠房挑高、化學品使用量變大等，導致工廠安全衛生風險管理需求更甚於半導體廠。有國內光電廠持續的擴建，使得廠房潛藏了更多安全衛生之風險，若製程單元發生防護失效或洩漏等情形，除了可能導致設備損壞、環境污染外，嚴重時可能造成人員傷亡或火災爆炸。由於光電產業投注之資本非常龐大，一旦發生工安事件損失往往難以估計。

本論文針對矽甲烷災害之防制，探討矽甲烷之物理性質、化學性質、燃燒與爆炸及其破壞情形，並提出安全防災之矽甲烷拖車供應系統操作方式之安全防護，以降低 TFT-LCD 廠之生產風險並保障相關作業人員之安全與衛生。矽甲烷為半導體製造上所必須之原物料，其具有自燃之特性且為最具威脅及破壞性化學物質。矽甲烷於廠務區以氣瓶櫃供應之方式供至

TFT-LCD 廠，矽甲烷其管線亦分布於全廠各區，使得 TFT-LCD 廠之生產運轉可能發生火災之風險相對升高。目前大量供應(Bulk Supply)矽甲烷可因減少更換氣瓶次數而減少風險。但由於量大且佔面積，目前之使用仍有限(如 TI)。未來製程發展若能兼顧安全及技術，則矽甲烷使用量及頻率降低可降低工廠風險。危害分析包含：製造端、運輸端與使用端，本文研究運輸端與使用端的防災區域、防災機制及防護練習等。

## 1.2 文獻回顧

光電及半導體業界近幾十年來蓬勃發展，如何確保廠務設施運轉穩定及供應品質符合要求，並減少故障等造成工業安全事件之異常發生，為廠內廠務及工安部門之迫切課題 [1]。為了解產業界目前與未來可能之問題與困難，針對作業安全進行研究與探討[2]。根據矽甲烷的物質安全資料表 MSDS 資料顯示，矽甲烷為一無色、會與空氣反應、有窒息性影響，與空氣接觸會自燃，燃燒時會釋放出未結晶的二氧化矽濃煙，主要的健康危害是此氣體在空氣中會自燃且有劇烈燃燒危害，高溫或火燄時，若鋼瓶的釋壓裝置故障可能引起鋼瓶爆炸。若矽甲烷在高壓下釋放或在高流速下，可能發生延遲性的爆炸，排放矽甲烷時若沒有發生自燃，便要小心有極大危險將發生，亦不可靠近排放區，緊急應變人員當進入洩漏區需穿著 SCBA 及全身防火衣，在未關閉瓶閥前不要企圖滅火 [3]。

矽甲烷在某特定壓力下外洩時並不會立即自燃，但外洩氣體會與空氣混合成為爆炸性混合氣體，形成一個龐大的爆炸性氣雲，當來源停止或排放壓力降低時，矽甲烷達到自燃條件，此時，矽甲烷自燃之火焰會引燃爆炸性混合氣，造成威力強大的爆炸，這也是自燃性矽甲烷所最容易產生的

危險狀況，故存放矽甲烷的槽車安全設計極為重要。

1982 年，Cruice 針對矽甲烷外洩進行測試，此研究的動機是因為美國 IBM 公司發生了嚴重的矽甲烷爆炸事故後，委託 Hazards Research Co. 對矽甲烷進行的研究，研究主要是針對純的矽甲烷外洩至氣瓶櫃與風管中進行測試，在某一次的測試中發現，矽甲烷外洩到氣瓶櫃後，經過約五秒鐘，氣瓶櫃發生嚴重爆炸，這是首次證實自燃性矽甲烷亦會延遲引燃，進而引發侷限空間爆炸的危害 [4]。

近幾年，國內學界對於矽甲烷在空氣中的外洩危害的研究有：

- (1) 王聖璋的矽甲烷外洩至空氣之引燃特性研究[5]：該研究是針對純矽甲烷經由透過流量控制器來控制出口流速來進行穩流的外洩進行測試，藉由搭配不同管徑，並利用暗影法搭配高速攝影機來捕捉出口端的流場與矽甲烷自燃與延遲引燃等特性狀況。
- (2) 陳政任教授的高壓矽甲烷外洩之行為及危害研究[6]：針對高科技光半廠最常用的自燃性矽甲烷氣體，進行外洩引燃行為、爆炸機制，透過有系統的測試，尋找純矽甲烷外洩至空氣中立即引燃之明確的條件。

矽甲烷的危害除了自身的特性外，有很大的部份是由於人為疏失，近幾年國內對於矽甲烷的人為可靠度的論文研究有游原鑑的矽甲烷供氣系統作業人為可靠度評估[7]與劉鴻世的矽甲烷( $\text{SiH}_4$ )氣瓶櫃操作人為失誤之分析[8]。

### 1.3 研究目的

半導體業及光電業因製程需求，於廠區內設置大型矽甲烷供應系統 (Trailer)，我們探討大型供應系統與氣瓶櫃供應系統不同處及安全管理、緊急應變上的風險。大型化氣體供應系統為產業的趨勢，隨著在半導體工業中危險的特殊氣體用量持續增加，使用較大型之包裝容器，並配合大流量自動供給系統，成為半導體製造工廠氣體輸送技術主流。更多有關安全標準的研究及測試，特別是氣體槽車的安全性評估，也隨之被建立。本論文探討矽甲烷的物質特性及其外洩情況，來了解矽甲烷之各種洩漏方式，藉此評估槽車運送的安全性。

## 第二章 主體研究

### 2.1 研究主體

矽甲烷是半導體製造上最具威脅及破壞性化學物質，不但人員之身體傷害、死亡，更會造成財產損失及生產中斷。日本發生曾災害案例，因操作者不知其可怕特性，認為矽甲烷與氧氣形成二氧化矽，殊不知矽甲烷與氧氣成爆炸性氣體，會造成設備損害及營業中斷。矽甲烷燃燒後產生二氧化矽或一氧化碳，後者會因衝擊或振動而引起爆炸。

矽甲烷氣體是一種在正常自燃溫度下具有自燃性之氣體。矽甲烷釋放時如一噴射式火焰。理論上，矽甲烷濃度在 LEL 濃度以上或以下會引起氧化反應是因排氣造成亂流。排氣管內的死角在正常排氣下，未反應矽甲烷不會累積至危險濃度；如果亂流沈澱，矽甲烷燃燒會造成壓力上升。在某些情形下，矽甲烷洩漏不會燃燒，而會形成矽甲烷蒸氣雲。因為矽甲烷的高反應性及不穩定特性，一旦蒸氣雲燃燒，會引起爆炸及破壞性過壓力 [9]。

目前矽甲烷供應方式受到高度的研究重視。就日本、美國對矽甲烷研究結果整理，並引用美國 UFC (Uniform Fire Code)、NFPA (National Fire Protection Association) 及 SEMATECH 研究作一建議及研討。

1992 年美國聯邦政府公佈實施的「高危害性化學製程安全管理法規 (Process Safety Management, PSM)」中，其對安全衛生管理的執行提出較完整的規範，要求業者執行製程危害分析 (Process Hazard Analysis，

PHA)，特色是以製程的操作特性為基礎訂定安全管理計畫；即依操作特性建立製程安全資訊，利用製程安全資訊執行製程危害分析，再運用危害分析的結果加強人員訓練、設備的管理及各項操作管理。許多因毒性或爆炸性物質外洩等重大工業災害的發生，其原因多為製程的管理缺失，有關製程安全管理的實施故逐漸受到重視，希望可預防或減少此類重大工業的危害發生。此外，高危害性製程工廠建立制度，對製程之修改應有正式的申請程序、核准程序、執行必要的安全評估、相關人員必須告知／訓練、技術資料須作必要之更新等。我國“危險性工作場所審查暨檢查辦法”亦要求訂定製程修改安全計畫，有別於以往業界慣用的工程服務申請程序，僅作經費與時程之管控，及 ISO 9000 較著重於文件管制，製程變更風險評估成為一項重要的課題。

PHA的要求包括：

1. 應評估下列項目：

- (1) 辨識危害
- (2) 由類似製程曾發生之事故研究所發現之工作場所潛在危害
- (3) 工程及管理控制措施
- (4) 設備設施配置
- (5) 人因工程考量
- (6) 對人員安全與健康之可能影響的評估

2. 可選用的分析方法有：

- (1) What-if 腦力激盪法
- (2) 檢核表(Checklist)分析
- (3) What-if 與檢核表分析
- (4) 危害及可操作性分析(Hazard and Operability Study, HAZOP)



(5)失誤模式與影響分析(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)

(6)失誤樹分析(Fault Tree Analysis, FTA)

(7)其他具有同等效力的方法

3. 危害分析應由對工程、操作及製程有經驗的人員組成評估小組來完成。評估小組至少有一人需熟悉評估方法。

4. 針對評估小組之發現與建議應有追蹤系統。

5. 至少每五年再評估一次。

6. 只要製程繼續運作，PHA 的相關資料與紀錄都應保存。

表 1 為製程各階段之危害分析方法 [10]。

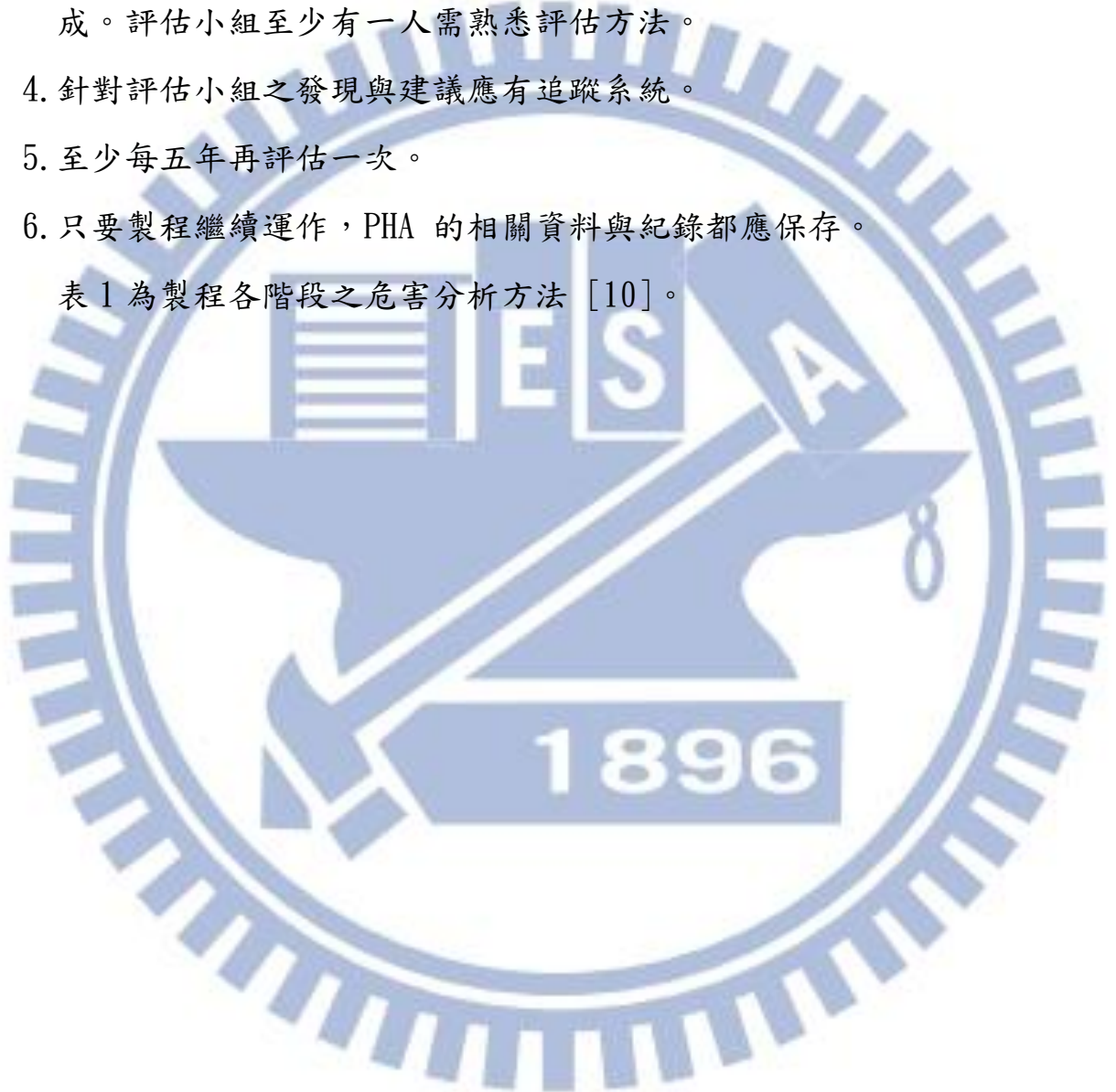


表 1 製程各階段之危害分析方法

	製程研發	基本設計	試驗工廠	細部設計	建廠階段	試車階段	正常運轉	擴廠或修	停廠拆除
文獻搜尋/ 工業實務調查	◎								
如果-會如何 (What-If)	◎	◎							◎
初步危害分析 (PrHA)		◎							
檢核表 (Checklist)		◎	◎		◎	◎	◎		◎
相對危害 等級分析		◎						◎	
危害與可操作性 分析(HAZOP)			◎	◎		◎	◎	◎	
失誤模式及影響 分析(FMEA)				◎		◎	◎	◎	
失誤樹分析 (FTA)				◎			◎	◎	
工場巡查					◎	◎			
安全稽核							◎		

系統安全分析的方法種類繁多，其用途亦依其功能而有所不同，危害及可操作性分析是由引導詞與製程參數的結合而產生有意義的製程偏離，但是並非所有的引導字都可應用於製程參數中，例如，當製程參數在溫度的考慮下，它的引導字只有「較高」或「較低」，而其它的參數則使得偏離而變得沒有意義。基本的進行模式是由幾個不同背景的專業人員以一種創造性、系統性的方式相互交換意見，並將所得到的結果整合起來，這種方式比起每個人獨自工作的方式可以辨識出較多的問題。其分析為定性性質，缺乏計量化。分析以集會討論方式進行，時間結果往往造成工程設計複雜化。也可能推衍出一些無意義後果之事件，如矽甲烷流動方向錯誤導致  $\text{SiH}_4$  流入  $\text{N}_2$  管線上混合，最後污染製程管／線，當事故發生時，會涉及多種作性分析。

文獻上曾對矽甲烷與氧的燃燒、爆炸機制的研究進行探討，在氧含量較高的情形下(>70%)，其燃燒生成物為  $\text{H}_2\text{O}$  與  $\text{SiO}_2$ 。如進一步增加矽甲烷濃度，則  $\text{H}_2$  會代替  $\text{H}_2\text{O}$ ，形成生成物。當矽甲烷濃度極高時(>70%)，其生成物為  $\text{H}_2$ 、 $\text{SiO}_x$  與  $\text{Si}$ ，矽甲烷濃度極高時的反應機制可能為熱生成爆炸反應。雖然該研究並未針對自燃的機制進行詳細探討，但有提及微量之水氣可能穩定矽甲烷與氧的混合，特別是在高矽甲烷濃度的條件，因此，大氣中的濕度可能為矽甲烷自燃與否的關鍵條件之一 [11]。

美國 FM 研究公司曾針對矽甲烷進行了目前最完整的測試，如圖 2-1 所示。研究結果發現，當矽甲烷濃度介於 1.4%~4.1% 之間時，矽甲烷與空氣的混合物具有爆炸性但其安定性很好，亦即不會自燃，但會被引火源引燃而發生威力強大的爆炸。而矽甲烷濃度介 4.5%~38%(最高測試濃度) 之間之混合狀態稱為半穩定(Metastable)狀態，在此狀況下，會發生延遲引燃，延

遲時間介於 15~120 秒，而延遲時間與矽甲烷濃度成反比，當矽甲烷濃度越高時其延遲時間則越短。此文獻之測試結果顯示立即自燃特性與初始壓力、出口條件有關，並推論與外洩環境的通風條件無關 [12]。

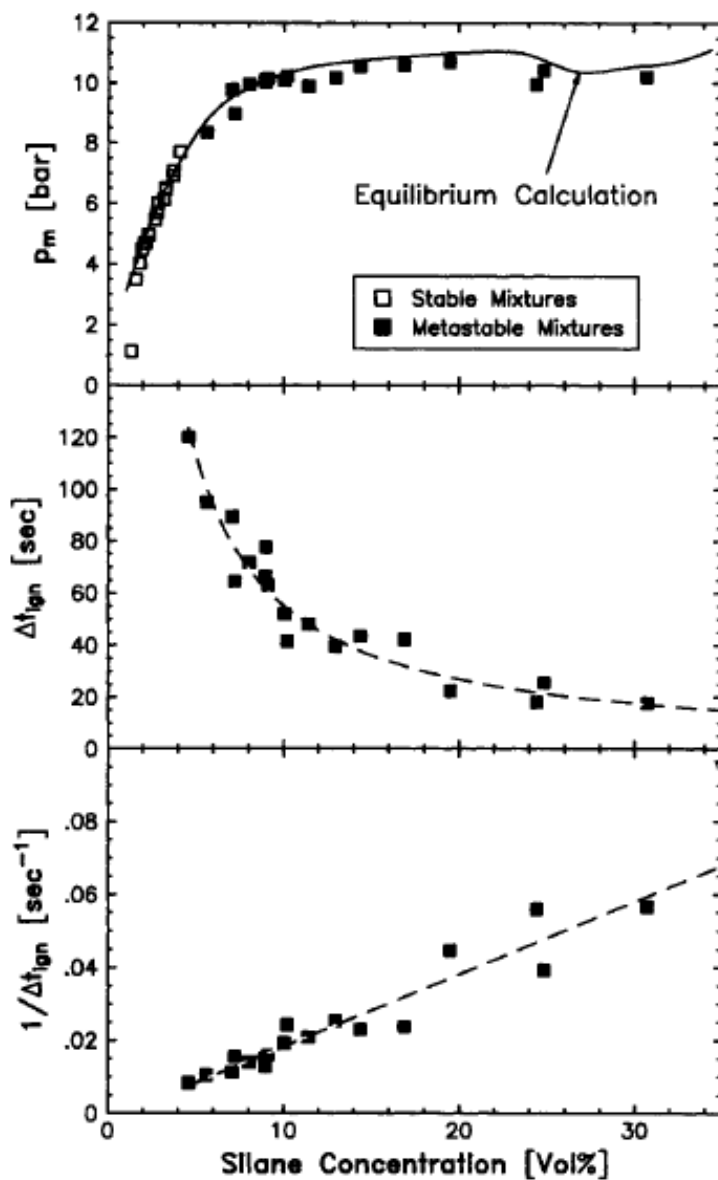


圖 1 半穩定狀態下矽甲烷的反應特性[12]

## 2.2 分析範圍探討

在 FMRC 指出五種矽甲烷可能燃燒方式中，大部分的燃燒都是發生在大量洩漏時的釋放燃燒與釋放速率減少(或壓力變化過大時)的自燃行為。至於在怎樣的情況下會導致爆炸，則需視矽甲烷鋼瓶洩漏情況與周邊之防護設備而定。

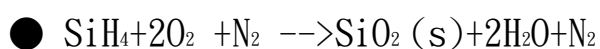
表 2 矽甲烷燃燒濃度範圍

濃度範圍	燃燒特性
$0 < C_{SiH_4} < 1.4\%$	非易燃燒性
$1.4\% < C_{SiH_4} < 4.5\%$	易燃燒性，穩定須燃燒源
$4.5 < C_{SiH_4}$	易燃燒性，半穩定(時間延遲後自燃)

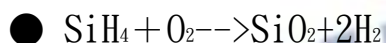
矽甲烷洩漏的技術數據可用以建立此物質輸送系統安裝及儲存的最小分離距離，距離的限制在洩漏事件中將財產的損失與人員的傷害降到最低。距離之決定依據其立即點燃及延遲點燃潛在爆炸效應的或然率，雖然壓縮氣體的失控洩漏起因於疏忽，但其可應用於工程上與管理上的管制以避免此物質釋放，從而使使用者在操作此一物質時將風險降低到一定的程度。

### 2.2.1 矽甲烷燃燒原理

(一)矽甲烷燃燒原理可表示為：(矽甲烷空氣中燃燒參數)



燃燒熱為-341 仟卡/莫耳(或-44.42 仟焦耳/克)，計算式中矽甲烷濃度 9.51 莫耳百分比。為矽甲烷的特性及在常壓自由擴張、定體積及爆燃。當矽甲烷一氧氣爆炸低於或等於 30 莫耳百分比矽甲烷，是不會形成氫氣。但矽甲烷濃度在 70 莫耳百分比或更高時，唯一氣態產物是氫氣而非水。



矽甲烷燃燒會放出大量二氧化矽粒。一磅矽甲烷完全燃燒約生成 1.8 磅二氧化矽。

當矽甲烷濃度在室溫下與空氣的混合體積比率為 4.5%，則可能自燃。達到此最低濃度時，並不表示一定會燃燒。而此種延遲燃燒現象會依矽甲烷濃度及與可能的亂流(Turbulence)而定。若要自燃產生，通常需要先達到「半穩定」的混合狀態，並且混合時間需夠長。但在矽甲烷混合物濃度高時不易預測。若要排除自燃可能性亦不因難，只要控制矽甲烷累積混合濃度在 4.5%閾限量以下。

文獻曾以不同管徑之測試系統對矽甲烷外洩危害進行探討，如圖 2 所示[13]，其外洩管徑內徑大小有 1/4'、1/2'、3/4'、1' 四種，利用旁通原理，將測試前矽甲烷通至安全地點，使用氣動閥將矽甲烷切換至測試管，在由所選定的管徑排出，計算出其出口流速。

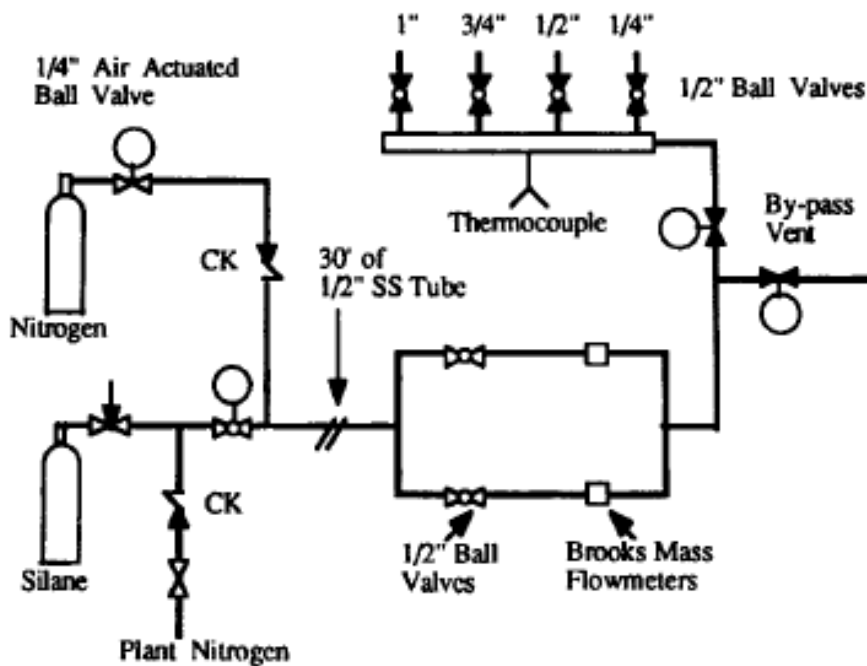


圖 2 利用不同管徑之系統測試矽甲烷之外洩危害

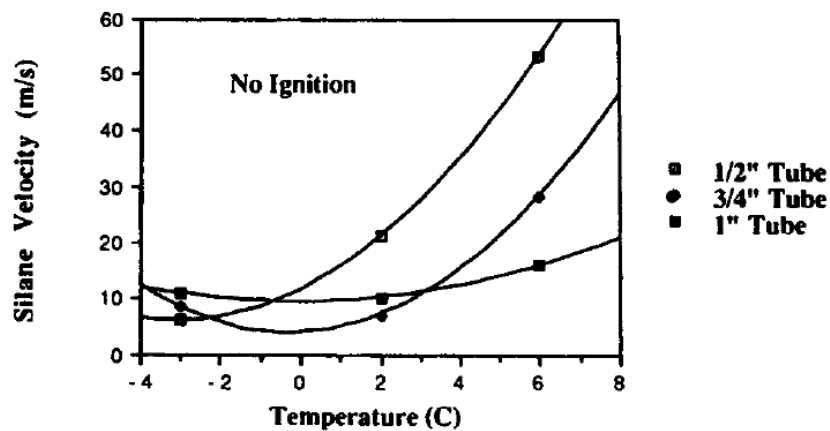


圖 3 不同管徑下，矽甲烷爆炸時溫度與流速之關係

上圖 3，顯示各管徑在不同溫度下矽甲烷立即引燃之出口流速，可發現不管任何管徑，當溫度上升時，其立即引燃的出口流速亦會隨之上升，其中特別提及當矽甲烷外洩時，引燃機率與外洩流速成反比，此外洩模式應有一臨界速度，當外洩流速超過此速度時，矽甲烷即不會自燃，當未達此流速時，則會立即自燃，此臨界速度應與溫度呈現相關性[14]。

## 2.2.2 矽甲烷開放空間之安全防護

近年來台灣半導體業大幅成長，因此矽甲烷在半導體業的應用也十分廣泛，也引起多起矽甲烷的工安事件。2011年9月16日清晨5點多，某面板公司后里廠發現矽甲烷鋼瓶(約450公升、125公斤)有外洩現象，立即通知供應廠商更換，但在廠商抵達前，洩漏氣體於上午9時許自行引發燃燒，該廠之緊急應變人員立即以水霧灑水降溫，並將火勢控制在鋼瓶周圍。本案發生後，在該面板公司的相關應變程序及持續灑水下，立即受到控制，發生洩漏之鋼瓶位於獨立區隔之建物(氣體房)內，與廠房建物及其他原物料保持相當安全的距離，火勢未影響到廠房及製程，無人員受傷，對營運亦無影響。當天下午即將洩漏鋼瓶內之矽甲烷抽出，移至另一安全鋼瓶內，現場狀況已全部解除。由於矽甲烷氣體接觸空氣就會燃燒，廠區人員以水柱降溫隔離火勢，並通知消防單位協助，研判是鋼瓶瑕疵造成氣體外洩，幸好是非毒性氣體不會造成危害。這起意外事故因該廠商於供應系統中安裝洩漏偵測系統，否則後果將不堪設想。[15]



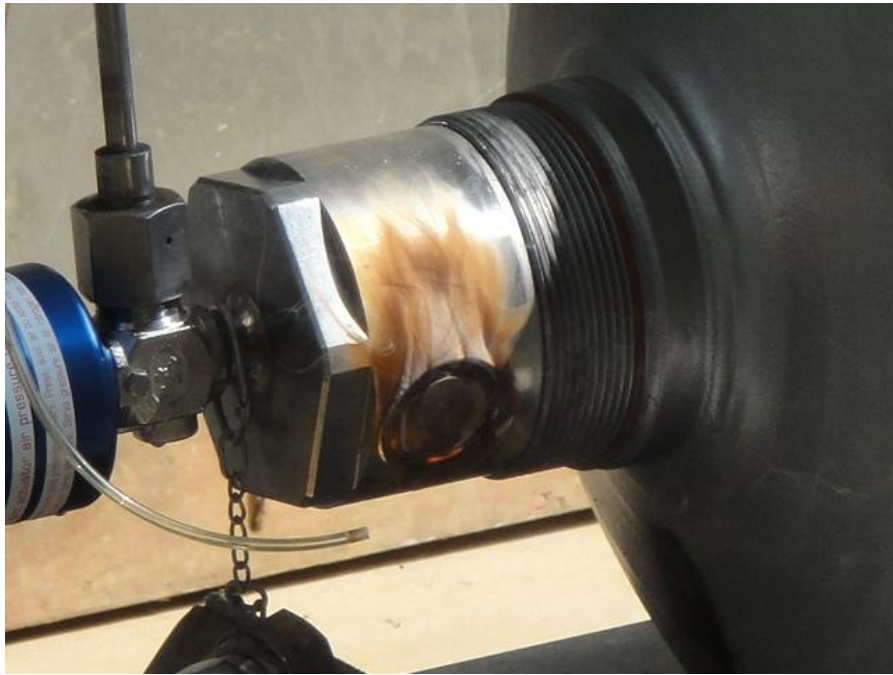


圖 4 矽甲烷工安危害事件(一)洩漏起火點源[2]

上圖 4，洩漏源起火點在壓力釋放裝置(Pressure Relief Device, PRD)產生外洩現象後，洩漏氣體經過一段時間後自行引發燃燒。



圖 5 矽甲烷工安危害事件(二)災害現場[2]

上圖 5，為何火警自動灑水設備未啟動？地板與周邊是乾的？因該廠自動滅火系統之設定為 UV/IR 及火警探測器必須同時發現異常才可起動，導致而目前的預警系統完全失效，無任何作用。



圖 6 矽甲烷工安危害事件(三)現場滅火[2]

上圖 6，該廠之緊急應變人員立即以水霧灑水降溫，在消防人員抵達迅速撲滅火勢，火場受到控制。發生洩漏之鋼瓶位於獨立建物(氣體房)內，與廠房建物及其他原物料保持相當安全的距離，火勢未影響到廠房及製程，無人員受傷，對營運亦無影響。當天下午即將洩漏鋼瓶內之矽甲烷抽出，移至另一安全鋼瓶內，現場狀況已全部解除。

本事意外故建議事項：

1. 必須找尋第三公正單位鑑定事故原因(避免由氣體供應商自己鑑定，以防有球員兼裁判之現象發生)。

2. 應避免同樣事情及類似事故之發生。
3. 應要求氣體供應商提供處理本類事故之緊急應變器材。
4. 此次事件業者危害認知不足，一開始誤判自清晨 5 點開始外洩到 9 點發現火災，中間歷經交換班時間顯得有所疏忽，且應變不夠迅速，應再強化物質危害特性認知教育訓練，並檢討現有緊急應變機制之合宜性。
5. 自動滅火系統之水霧作動建議改成 UV/IR 或火警探測器有一發現異常即起動，而目前二者同時發現才作動。

根據許多研究機構的研究調查歸納顯示，矽甲烷外洩的事故中絕大部分會造成火災，其中的事故有些是在氣體供應系統中所發生的，如發生在換鋼瓶過程。在臺灣半導體產業的發展中，矽甲烷造成事故，多為切錯管、不當排放等，導致少量矽甲烷外洩、燃燒，因此了解矽甲烷的特性有其必要性。

根據勞工安全衛生設施規則（民國 98 年 10 月 13 日修正）第 185-1 條，針對雇主在矽甲烷的使用上有其規範 [16]。雇主對於常溫下具有自燃性之矽甲烷之處理，除依高壓氣體相關法規規定外，應依下列規定辦理：

- 一、氣體設備應具有氣密之構造及防止氣體洩漏之必要設施，並設置氣體洩漏檢知警報系統。
- 二、氣體容器之閥門應具有限制最大流率之流率限制孔。
- 三、氣體應儲存於室外安全處所，如必須於室內儲存者，應置於有效通風換氣之處所，使用時應置於氣瓶櫃內。
- 四、未使用之氣體容器與供氣中之容器，應分隔放置。
- 五、提供必要之個人防護具，並使勞工確實使用。

- 六、避免使勞工單獨操作。
- 七、設置火災時，提供冷卻用途之灑水設備。
- 八、保持逃生路線暢通。

形成未限制蒸氣雲爆炸必須先有物質洩漏，蒸氣雲濃度在燃燒上下限間，並達到穩定態，最後要有引火源產生。以矽甲烷而言，引火源是流量降低或關閉時。以氣瓶櫃而言影響蒸氣雲爆炸為釋放燃料的量及釋放速率及型態、阻擋物、限制區間釋放型態、風速及風向也會決定蒸氣雲的位置及尺寸。而燃燒源位置、型態及燃燒延遲則決定蒸氣雲規模及蒸氣雲爆炸的爆炸能量。探討如下：

#### 一、閥件被關閉燃燒：

在 FMRC 及 UC 實驗中指出在閥件被關閉時，會持續產生爆炸聲或「POP」聲。一種例子是釋放至地面或建築物，加上非常低的風速，會在釋放點形成蒸氣雲，如立即關閉釋放，引起燃燒，造成如罩造雲似中央燃燒。較非中央燃燒(尾部或側邊)或由拉長形狀蒸氣雲過壓力危險性大。

#### 二、緩慢降低流量：

因氣瓶櫃內氣體用盡或閥件在離洩漏端很遠處被關上，當噴嘴速度減少時，矽甲烷在釋放口變得因傳導而點火。這種結果將導致最糟的中央蒸氣雲燃燒。

#### 三、未侷限空間蒸氣雲爆炸 (UVCE)：

因為內部過壓而造成容器失效或在開放空間累積燃燒迅速引起爆炸波。這些現象如果發生在室外，則會造成破壞性的過壓力。UVCEs 不同型態有爆炸，爆燃及大量自動燃燒。

爆燃是一種放熱反應，如非常快速易燃性粉塵或空氣中蒸氣氧化。未燃燒物質以低於音速進行。質量傳送機制是延燒的來源。爆炸是一種放熱反應，因建立及維持反應引起振波存在特徵。在反應區間物質進行速度大於音速。加熱機制原理是因震波壓縮。震波機制是延燒來源，而這些反應在開放空間中產生震波。

大量自燃參與反應的所有顆粒同時燃燒，當自性氣體在大量自燃情況下燃燒時，不會產生燃燒波，且物質在任何點變成燃燒產物，蒸氣雲每一個部份立即升至燃燒氣體狀況。蒸氣雲在燃燒時沒有時間擴張。壓力上升速度應為無限且沒有任何可完全控制的功能。在完全開放空間下，矽甲烷氣體大量洩漏，會造成延遲燃燒而造成爆炸的適當條件，但 UVCEs 釋放與蒸氣雲形成的頻率是很低的，結果是不會有爆炸危險。

在室外供應矽甲烷時，引燃蒸氣雲造成過壓力，有室外侷限空間及亂流形成。矽甲烷洩漏通常會燃燒，在局部侷限空間爆炸區間的形成，由高度亂流狀況產生，易生成爆炸。蒸氣雲中央的阻擋物不但加速混合且增加火焰速度，引起較高的過壓力。即使侷限非常小，依其破壞情形來看，仍有爆炸情形出現。足夠面積開放空間及空氣流量造成釋放矽甲烷立即燃燒減少爆炸之風險。

矽甲烷輸送系統，可使自供應的氣源傳輸矽甲烷到另一定點的系統，其使用管路銜接內部傳送器及/或使用此物質；矽甲烷氣體輸送系統的管路與元件包括：

- 容器銜接
- 製程控制盤面及整合元件

- 沖吹氣體盤面及整合元件
- 製程氣體盤面與沖吹氣體盤面之間的管路
- 製程氣體盤面的出口點，此氣體可能流向建築物管路系統或如果使用氣體供應分歧箱/模組供個別點使用的氣體供應分歧箱。

矽甲烷釋放顯現的危害是由於它具有潛在的可燃性或者爆炸。如果矽甲烷釋放到侷限的空間，矽甲烷立即或延遲或自動點燃的效應如同當大氣立即包圍燃燒物質時潛在嚴重的放熱與膨脹。大氣的膨脹與潛在震波經由點燃物質的傳播可導致鄰近氣源之人員傷害與建物及設備的受損。室外區域使用是減少或消除這些效應的方法。

依 HRC 研究結果，未侷限情況下，矽甲烷燃燒能量可以爆燃情形敘述。低度及中度洩漏一般會立即自燃，而在中度空氣混合下，速度更快。

## 2.3 基本資料

### 2.3.1 矽甲烷基本物理化學特性資料

矽甲烷具自燃性，但被排放至大氣中時，並不一定會著火。若缺乏瞬間點火源，可能導致延遲自燃而造成火球或蒸氣雲爆炸，其特徵介於爆燃到爆震的範圍。重要的是，務必要了解矽甲烷的自燃本質及其自燃周邊的狀況。

純的矽甲烷釋放的點火及燃燒已成為主要的研究課題。根據這些研究，建立了矽甲烷在空氣中的燃燒下限(Lower Explosive Limit, LEL)為1.37%。空氣中矽甲烷濃度達1.37%至4.5%時，可經由外部火源(前導點火)點燃而造成爆燃，其線性燃燒速率可達5m/sec。當空氣中矽甲烷的濃度超過4.5%時，混合物會成為介穩狀態，在特定延遲後會進行大量的自燃，在較高濃度下，其點火延遲時間較短。測試結果亦顯示，矽甲烷與空氣混合物即使在較高的濃度下也不一定自燃。延遲點火可能會造成爆燃或爆震，矽甲烷輸送系統建議於置於室外，以預防當矽甲烷釋放造成潛在的蓄積。雖然建議在室外使用，但室外系統的使用無法完全依循，因為現場或環境考量，例如矽甲烷混合物的其他成分具有毒性 [17]。

矽甲烷的主要危害為矽甲烷燃燒的火焰或熱輻射之燒傷。因其自燃的本質，矽甲烷毒性的資訊相當少；然而美國工業衛生師協會(ACGIH)已制定5 ppm 濃度作為恕限值—時量平均容許濃度，以保護工作人員免於暴露在此物質時造成眼部、皮膚及上呼吸道刺激的風險。此外，吸入矽甲烷氧化物也潛在對健康造成危害。矽甲烷燃燒時產生的矽氧化物可導致呼吸道的刺激。

表 3 矽甲烷物理化學特性

成份辨識 資 料	中文：矽甲烷      英文：Silane	
	化學式：SiH <sub>4</sub>	
	同義名稱：四氫化矽	
	含量：>99. %	
	化學文摘社登記號碼(CAS No.)：7803-62-5	
	特殊危害：自燃性	
特 性	分子量	32.118
	密度@一大氣壓& 21°C	1.33 kg/m <sup>3</sup>
	比重 (70°F)	1.2(air=1)
	比重體積 (70°F)	12.0 ft <sup>3</sup> /lb
	沸點	-111.7°C (-169.0°F)
	氣體密度	0.0899 lb/ft <sup>3</sup>
	燃燒熱	0.67 KJ/mol
	物質狀態	壓縮氣體
	自燃溫度	未知，室溫以上會自燃
	顏色	無色
氣味	窒息性味	
火 災	臨界溫度	-3.4°C
	臨界壓力	703 psia
	臨界密度	15.4 lb/ft <sup>3</sup>
	爆炸上限(UEL)	100%
	爆炸下限(LEL)	1.37 %



	NFPA 分類	健康危害等級(Nh)：1
		火災危害等級(Nf)：4
		反應危害等級(Nr)：3
	燃燒後效應	火災時可能產生刺激或毒性氣體
	空氣中燃燒濃度範圍	1.37%~96%
	空氣中爆炸濃度範圍	9%~25%
健康	容許濃度(TLV)	5 ppm
運輸	UN 編碼	2203
	緊急應變指南	116
	圖式標示	2.1 & 2.3

## 2.4 矽甲烷在產業上的應用

### 2.4.1 矽甲烷在產業上的應用角色

國內目前矽甲烷使用量在 2007 年 587 公噸，2011 年需求量約 1,200 公噸。而矽甲烷氣體在三大產業(半導體、平面顯示器、太陽能)的製程中扮演著極重要的角色[18]。例如，半導體產業會將矽甲烷用在 IC、磊晶產品與多晶矽相關產品；在多晶矽相關產品方面，矽甲烷氣體應用在還原、製造多晶矽；應用在磊晶產品方面，矽甲烷氣體應用在長晶品質、在高溫化學氣相沉積 (Chemical Vapor Deposition, CVD) 製程中製造磊晶矽。在平面顯示器產業方面，薄膜電晶體液晶顯示器的面板產品，矽甲烷氣體常應用於化學氣相沉積。而太陽能產業方面，太陽能產業主要分為太陽能電池產品與非晶矽薄膜產品，矽甲烷氣體常應用於製造過程；太陽能電池產業主要以矽甲烷做為供應氣源，利用電漿輔助化學氣相沉積製程 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)，在不銹鋼基板或玻璃上沉積，以製造矽薄膜太陽能電池[19]。

### 2.4.2 矽甲烷在光電產業上的重要性與風險

光電產業在製程中的矽甲烷使用量為半導體製程的數倍，因此以機率論來說，光電業因為使用矽甲烷而必須承擔的風險與損失都遠比半導體業要來的高，發生工安意外的次數也比半導體業來的多。

據統計，矽甲烷在國內平面顯示器製造廠來說，由矽甲烷供應系統所引起的火災名列前十大火災起因[20]。

在光電產業中，矽甲烷是以平面顯示器使用量最大，尤其是薄

膜電晶體液晶顯示器 (TFT-LCD)。

TFT-LCD 為平面顯示器的一種，近幾年由於能源危機的產生與環保意識抬頭，因此綠能產業趁勢而起，因此電器產品的輕薄、省電與小型化遂成為消費者的基本需求，因此 TFT-LCD 遂成為台灣的顯示器市場上最蓬勃發展的新寵兒。

TFT-LCD 從 3 代生產線發展至現今之 7、8 代生產線，投資金額也增加到 1000 億元以上，形成了另一股資本密集及技術密集的產業。

#### 2.4.3 矽甲烷在 TFT-LCD 的應用

以 TFT-LCD 製程來說，在製程中所用的氣體可分為二類：一類是用量較大的普通氣體，例如：氮氣、氫氣、氫氣、氧氣、氮氣等；而另一類是用量較小的特殊氣體，例如：矽甲烷、磷化氫、氯氣。在 TFT-LCD 廠內使用的矽甲烷係高危害物質，其無色且會和空氣反應、有窒息性等影響。因為矽甲烷與空氣接觸會自燃，而且燃燒時會釋放出未結晶的二氧化矽濃煙，因此矽甲烷在空氣中會自燃而且會有劇烈燃燒的危害並引起爆炸。

TFT-LCD 廠在氣體供應規劃設計時，為考量這些氣體的安全性，所以按照氣體的危險性來分類，將氣體隔離供應上也會分區域[21]。

TFT-LCD 在工廠的主要製程有：Array 製程-製作薄膜電晶體基板、CF 製程-製作彩色濾光片基板、Cell 製程-將兩片基板組合並灌入液晶。

Array 製程主要是由玻璃製造工廠生產之素玻璃先完成洗淨工作後，再透過成膜、黃光、蝕刻與去光阻四大生產程序產出薄膜電晶體玻璃基板；CF 製程主要是進行黑色矩陣、紅色矩陣、綠色矩陣、藍色矩陣、鍍導電膜之生產程序製作出彩色濾光片玻璃基板；Cell 製程主要是將 TFT 與 CF 兩片

玻璃基板分別洗淨後進行配向、框膠塗佈、液晶注入，最後再將切割後的玻璃基板兩側分別以偏光片進行貼附程序。

TFT-LCD 顯示器在製程中所產生的危害主要由各生產程序中所使用的設備、氣體與化學(藥)品產生，這些危害包括物理性的機械危害、化學性的有害氣體、危險性氣體、有害化學品、危險性化學品與輻射的危害；一氧化二氮(N<sub>2</sub>O)與矽甲烷(silane)共同用於氮化矽層的化學氣相沉積，氮化矽層的主要作用則是鈍化、遮罩或隔離，TFT-LCD 顯示器之製程危害如下圖 12[18]：



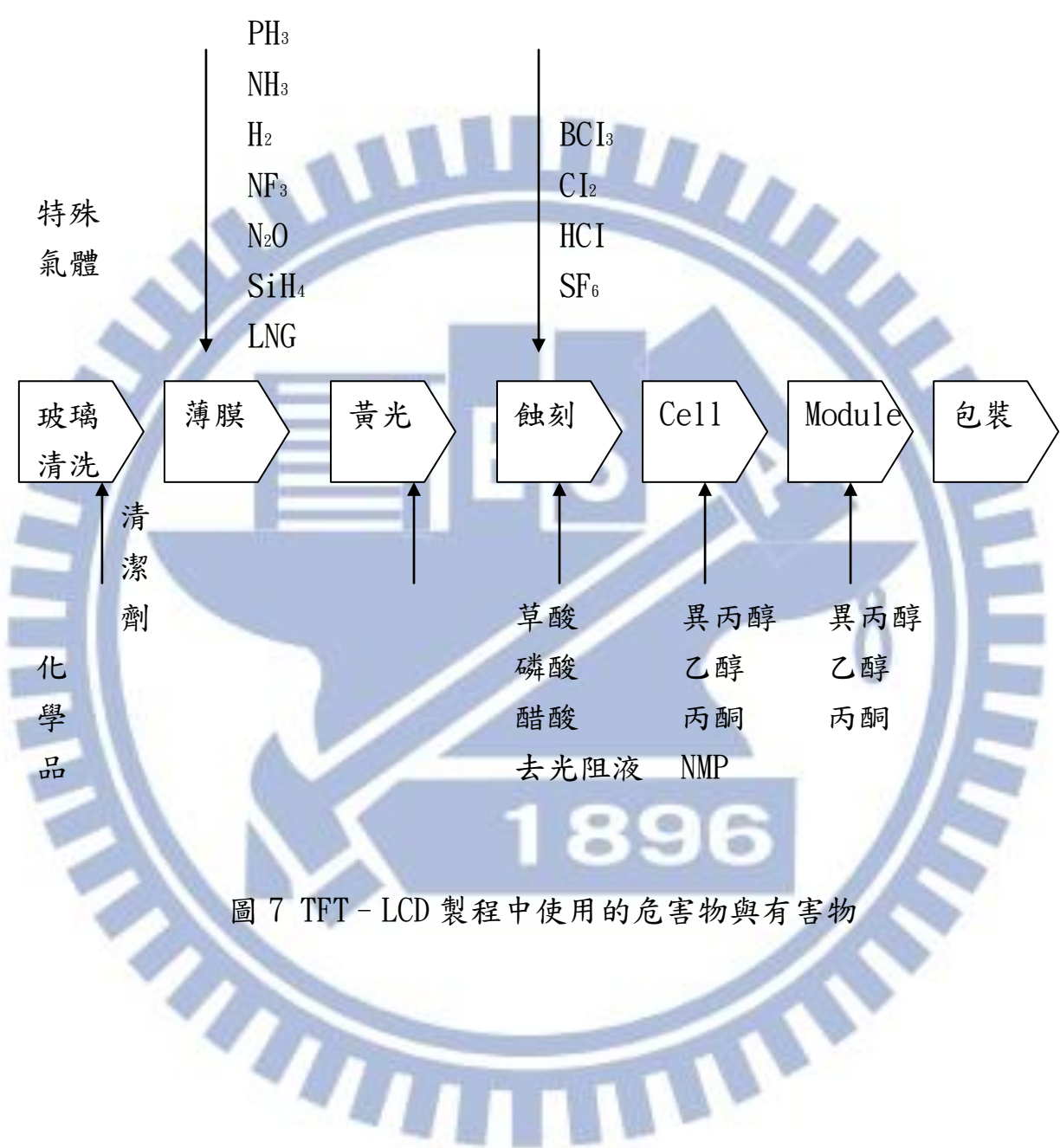


圖 7 TFT - LCD 製程中使用的危害物與有害物

#### 2.4.4 矽甲烷目前之存放方式



圖 8 450 公升 Y 型鋼瓶暫存區[2]

上圖 8，目前以 450 公升 Y 型鋼瓶暫存區一般設計多為三層的堆疊方式，此存放方式危險性極高，在滅火系統在最上層鋼瓶上滅火，下層的鋼瓶並無法有效防護，達成預期之滅火效果。



圖 9 槽車暫存區[2]

上圖 9，因國內尚未開放槽車以固定供應氣體的方式，目前  $\text{SiH}_4$  槽車均以「填充鋼瓶氣體」做為現階段的功能。



圖 10 露天鋼瓶暫存區[2]

上圖 10，露天置放鋼瓶等同於將危險曝曬中。

## 2.5 研究流程圖

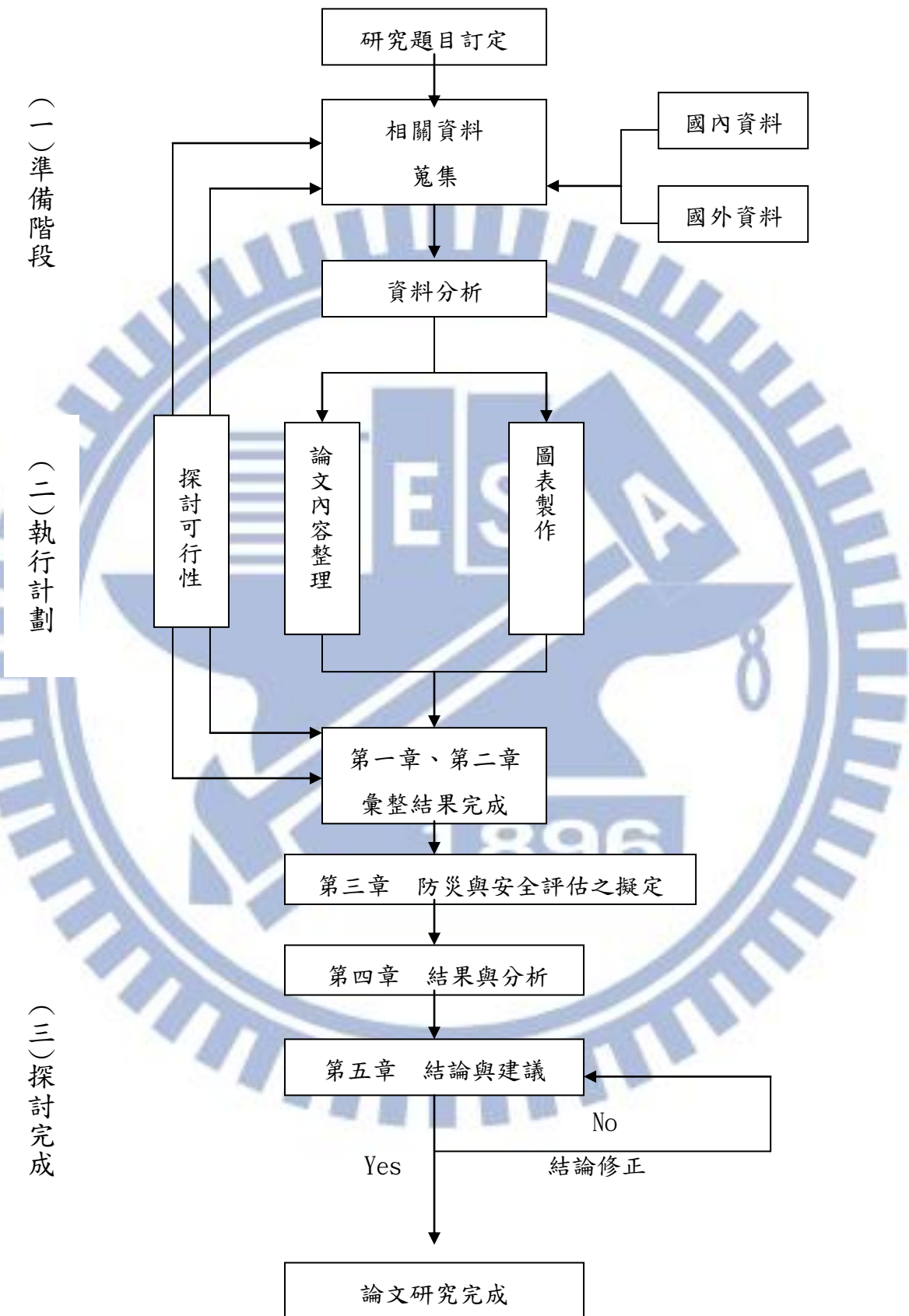


圖 11 研究流程圖



### 第三章 矽甲烷拖車供應系統之防災與安全評估

大量使用矽甲烷之設施目前被研究使用因其可以減少人機接觸的系統機會，另一重要優點是可減少原料及人工成本，同時矽甲烷拖車具有之工程控制設施依 NFPA68 爆燃洩壓指引，NFPA69 爆炸預防，NFPA70/500 電力法規。1994 年版「UFC 80-1 儲存 供應及使用矽甲烷及其混合物」，在 8003.8 節允許灑水器、爆炸控制、機械排氣、電器防爆、緊急電力供應及如果儲存量大，則需要分開的建築物，且過壓力時必須與主建築物有足夠距離。若果矽甲烷或其混合物超過體積大於 2%則應符合 UFC No. 80-1。

拖車與鋼瓶系統之設計除純度外，在系統及元件上是相似的開放空間以防火牆區隔重要閥及設施，對於進入拖車之管制、水霧系統保護、三個 UV 偵測器、專屬之氮氣供應及圍籬及監視器等警衛系統。



圖 12 槽車示意圖[2]

### 3.1 矽甲烷配送系統安全設計

#### 3.1.1 危害與可操作性分析

矽甲烷大宗氣源使用的設備包含大宗氣源及其監控系統。來源包含 ISO 模組、管式拖車、鋼瓶組或個別容器（具總水容量大於  $8.8\text{ft}^3(250\text{L})$ ）。監控系統包括控制面板、掃氣氣體面板及控制面板。本次討論即針對常見業界使用矽甲烷原料之製程流程標準，做為危害與可操作性分析(HazOp)進行模擬的目標，由此探討矽甲烷大宗氣體製造及儲存安全風險，其流程圖如下。

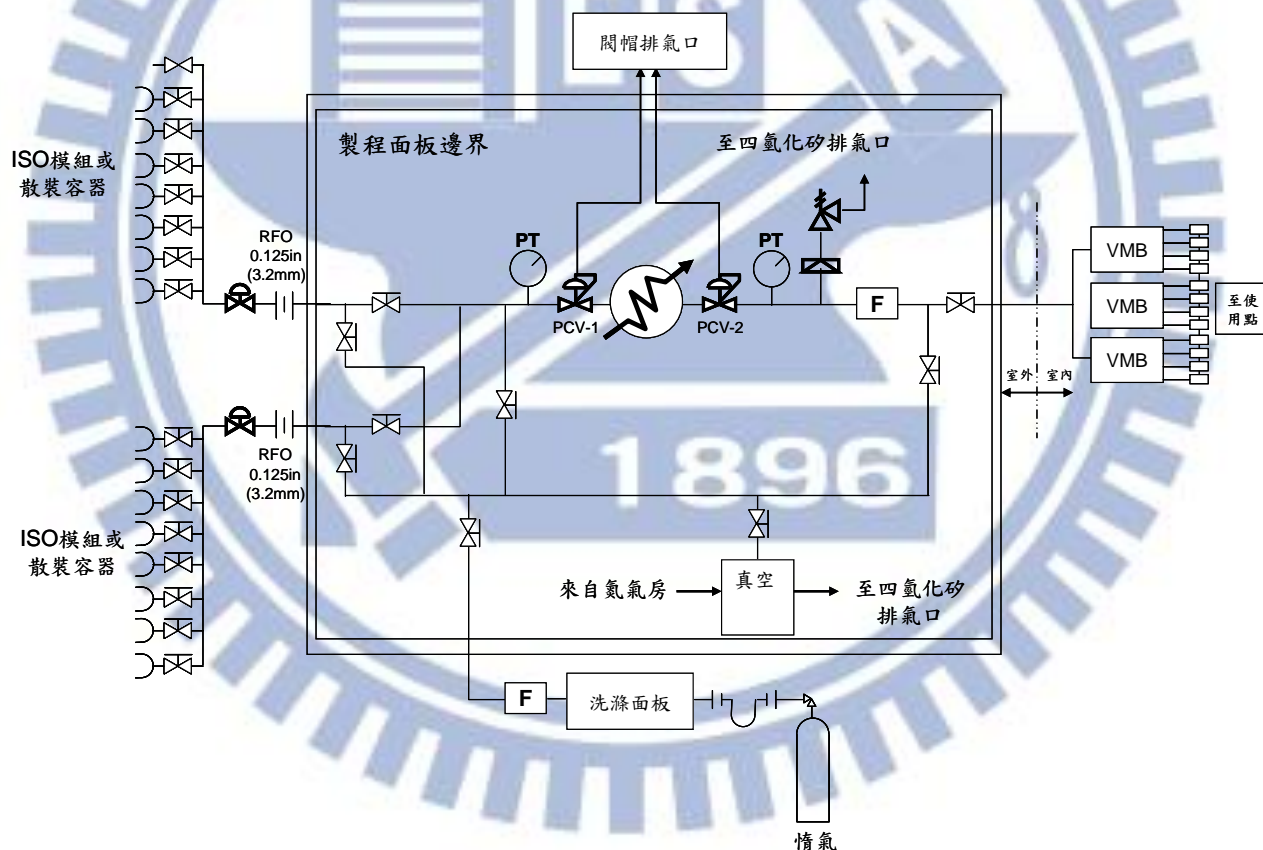


圖 13 典型的大宗系統製程流程圖

上圖 13，為目前製程上矽甲烷供應之方式。

### 3.1.2 矽甲烷配送系統設計

#### 一、等效的矽甲烷包裝

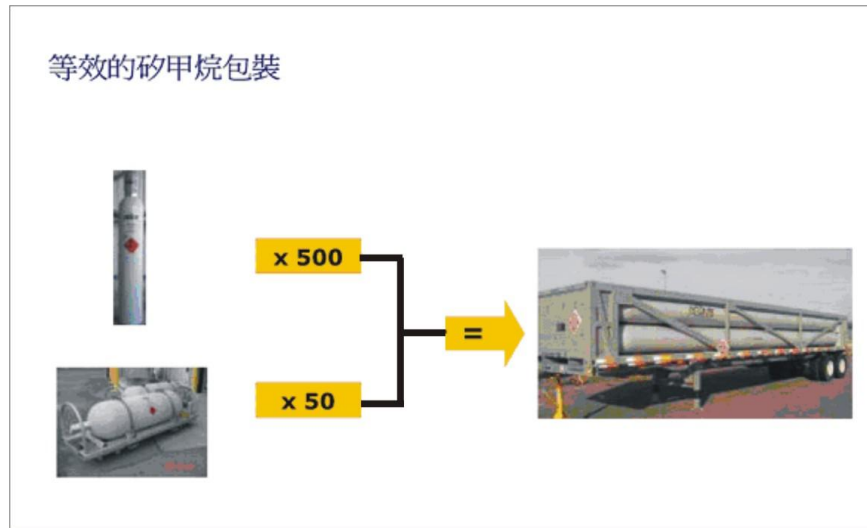


圖 14 與槽車等效之矽甲烷包裝

上圖 14，有人就有失誤，Trailer 與 Tonner、Bundle 之間的數十倍到數百倍的等效包裝，減少一次換裝氣體等於減少一次危險機會的產生。

#### 二、矽甲烷 ISO 規格貨櫃容器與裝置之各部名稱



圖 15 矽甲烷 ISO 規格貨櫃容器之各部名稱

矽甲烷 ISO 規格貨櫃容器之各部名稱：

1. 槽車艙房。
2. 矽甲烷儲桶。
3. ISO 框架。
4. 槽車底盤。

## (二) 矽甲烷各種裝置之各部名稱

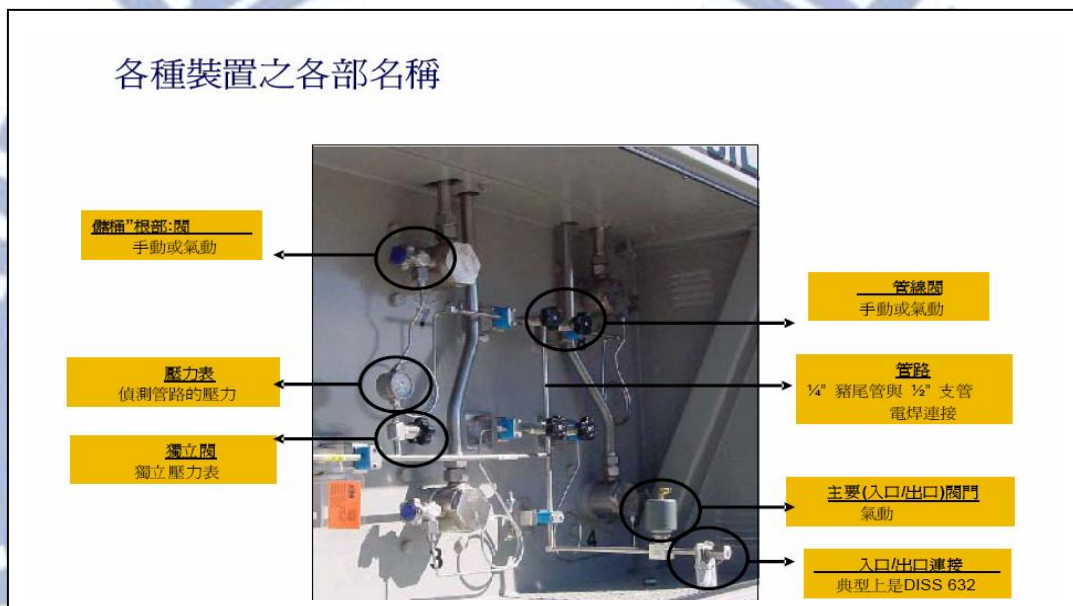


圖 16 矽甲烷 ISO 規格貨櫃容器與裝置之各部名稱

矽甲烷 ISO 規格貨櫃容器與裝置之各部名稱：

1. 儲桶根部閥：手動或氣動
2. 壓力錶：偵測管路壓力
3. 獨立閥：獨立壓力錶
4. 管線閥：手動或氣動
5. 管路：¼" 豬尾管與½" 支管電焊連接
6. 主要(入口／出口)閥門：氣動
7. 入口／出口連接：典型上是 DISS 632



圖 17 矽甲烷槽車之輸送歧管裝置[2]

### 3.1.3 矽甲烷 ISO Trailer 容器之認證

許可證明上要載明該容器符合下列各應用的規格：

- 美國運輸部(DOT)—49 CFR
- 美國鐵路協會(AAR)—AAR-600
- 經由道路或鐵路運輸的危險品之國際車廂—ADR & RID 歐洲
- 國際海上組織(IMO)—IMDG 世界海洋運輸
- 安全貨櫃的國際公約(CSC)—全世界的 CSC
- 鐵路國際聯盟(UIC)—歐洲
- 美國海關認證(TIR)—美國

### 3.1.4 典型矽甲烷 Trailer 容器規格

#### 一、典型矽甲烷 Trailer 容器規格

表 4 矽甲烷槽車規格

長度	18.5 英尺(5.6m)	36 英尺(10.9m)
規格	DOT/ISO 3AAX-2400	DOT 3T-2400
口徑	22 英吋(55.8cm)	22 英吋(55.8cm)
材料	AISI 4130	AISI 4145
設計壓力	2,400 psig (166 bar)	2,400 psig (166 bar)
張力強度	105 ksi 最小(724 MPa)	135~155ksi(931~1069 MPa)
厚度	0.563 英吋(14.3mm)	0.415 英吋(10.5mm)
重量	2605 lbs(1182 公斤)	4011 lbs(1819 公斤)
水量	40.4 cf(1144L)	80.7 cf(2370L)

#### 二、ISO Module/Tube Trailer

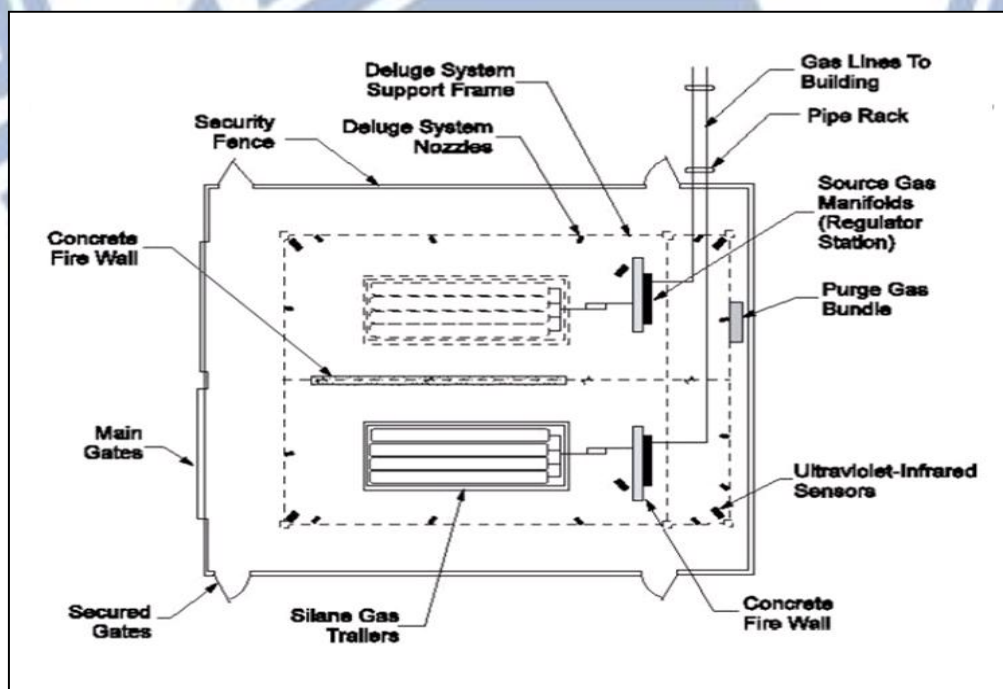


圖 18 ISO 之矽甲烷槽車規範

以上設備名詞對照：

- Security Fence：安全圍籬
- Concrete Fire Wall：水泥防火牆
- Main Gates：主要出口
- Secured Gates：安全出口
- Silane Gas Trailers：矽甲烷氣體拖車
- Deluge System Support Frame：洪水系統支持框架
- Deluge System Nozzles：洪水系統噴管
- Gas Lines To Building：排氣管連接建築物
- Pipe Rack：管子機架
- Source Gas Manifolds(Regulator Station)：氣體來源(調節站)
- Purge Gas Bundle：洗淨大量氣體
- Ultraviolet-Infrared Sensors：紅外線偵測器

ISO 之矽甲烷槽車規範用於大宗矽甲烷氣源安裝之使用設備，包含大宗矽甲烷氣源及其相關之附屬控制設備。大宗矽甲烷氣源包含 ISO 標準模組之管束拖車、鋼瓶集束組、或是水容積總計達 8.8 立方英尺(250 公升)之單一容器。

附屬控制設備包含製程系統氣體控制盤面、沖吹氣體之控制盤面和儀電控制面盤。大宗氣源供應系統，將矽甲烷分配傳送至室內之各使用點。建物內之分配傳送方式與設備，通常透過氣體供應分歧箱/模組(Valve Manifold Box, VMB)來執行。一台槽車包含許多圓筒型管束固定於框架中，適合陸地運輸及海上船運。典型的管束直徑是 2 呎 (0.6 公尺)，長度介於 20 呎至 40 呎(6.1 公尺至 12.2 公尺)之間。在模組的輸送端是以閥件歧

管將各個管束互相連結。管束拖車模組中，每支管束本身必須安裝隔離閥，使管路盤面具備隔離矽甲烷供應的能力。

### 3.2 大型矽甲烷供應系統需求

根據美國 CGA 協會矽甲烷之大型化供應與其安全測試研究結果 [22]。隨著在半導體工業中危險的特殊氣體如矽甲烷的用量持續增加，使用較大型之包裝容器，並配合大流量自動供給系統，儼然成為半導體製造工廠氣體輸送技術主流。更多有關安全標準的研究及測試，特別是儲藏使用設施所需預留距離的估算，以及安全操作法規如 Uniform Fire Code 等也隨之急須被建立。本文除使用實際設計案例來介紹矽甲烷之大型自動供給系統外，並將引用美國 CGA 協會(Compressed Gas Association of America)最近所完成之矽甲烷安全測試結果，來強化對矽甲烷危險性的認識。此研究以一系列不同供應規模的矽甲烷外洩測試，來量化矽甲烷之各種洩漏參數對累積外洩可燃量及其潛在延遲爆炸之影響[23]。

由於矽甲烷屬於高危險性的半導體製程用氣體，其大型自動供給系統之設計也與一般惰性(Inert)氣體有所不同，在沖流(Purge)、限流防護裝置(Excess Flow Switch)，排放(Vent)，及真空抽排(Vacuum)功能上都有特別的考慮。為了能達到 100%穩定的供應效果，系統的設計也都是採用雙重流程，不僅裝置兩個氣體來源容器，並將重要組件及管路都作備份設計(Redundancy)。可用以下一個實際案例來做進一步的說明：

針對某一個月產能 3 萬片的 8 吋晶圓半導體工廠，其矽甲烷月用量估計約在 600kg，但該廠未來可能進行製程升級或產能擴充，而月用量可能升



高到 1000kg，矽甲烷流量要求將超過 50 slpm，輸送壓力在 50psig，該廠若不採用大型自動供給系統，則必須裝設 10 台以上的氣瓶櫃，同時也需 10 支以上矽甲烷鋼瓶輸送氣體才能滿足製程需求。經過詳細的設計、施工、安全及經濟效益評估後，該廠決定採行大型供應的觀念，以下則是所建議的大流量矽甲烷供應系統架構說明：

(一)輸送台(Delivery Pad)：

為裝置大型氣體來源容器的戶外區域，依照用量估算，建議使用兩組 Y 型容器(內容量 444 公升)，每組可內裝 89.5Kg 之矽甲烷。

(二)輸送連接裝置(Discharge Pigtails)：

包含兩組 pigtail 連管來連接 Y 型容器的閥門以及沖流/排放/真空抽排裝置來進行系統洗淨操作。這項裝置可確保容器更換時的安全操作，惰性氣體如氮氣(N<sub>2</sub>)進行沖流操作來減少系統中矽甲烷的消耗量。在 pigtail 連管上並裝有自動關閉閥(Automatic Shutoff Valve)，在無電力供應或停機時會自動停止氣體流動，同時也可裝設高壓測漏裝置作線上(On-line)洩漏檢測。

(3)交叉連通面板(Crossover Panel)：

此面板藉由連接管路來控制矽甲烷氣流進入下游組件的方式，提供了單一管路、交叉管路或雙重管路的多種流動模式來確保 100%穩定的供應效果。

(4)壓力控制過濾分歧模組(Pressure Control Filter Manifold, PCFM)：

PCFM 提供了加熱、壓力調節、過濾及安全性洩壓的功能。由高壓 Y 型容器(2100psig)輸送出的矽甲烷經由兩組 PCFM 調節壓力並經過濾器後，即會合成單一低壓(25~75psig)輸送管路進入工廠；在上游高壓端及下游低壓端均裝有壓力量測裝置來偵測壓力。在壓力調節閥前並有流程加熱器來避免急劇壓降所產生的 Joule-Thomson 冷凝造成矽甲

烷液化。另有提供一個 1~6KW 的小型外部加熱器裝設在 PCFM 中來確保閥門管件不會產生結冰冷凝的現象。系統最高輸送流量可達 100 slpm。

#### (5) 電子控制櫃(Electrical Control Cabinet, ECC)：

ECC 中的控制器提供了整個大型供應系統的自動操作功能，包括了壓力調節及加熱器的控制，內附有通訊系統板可連接到用戶的中央設施管理控制系統上，ECC 也包含了緊急供電系統(UPS)提供 20 分鐘的備用電力。ECC 控制器在任何監測的參數超出正常設定範圍時會啟動警報(Alarm)裝置以便通知操作人員緊急處置；ECC 一般可隔離裝設在建有防護牆的遠端區域以遠離矽甲烷集中儲放區域。

### 3.2.1 矽甲烷安全測試研究介紹

美國 CGA 協會與其委託之工程顧問公司，和多家相關領域的贊助公司，與單位共同完成了此項研究計劃。其結果顯示，矽甲烷外洩至空氣中將導致火災或爆炸。如果持續劇量外洩並立即著火會產生噴射式起火。若外洩持續達某一定量條件後，甚至會產生爆炸；爆炸結果的主要影響則是震波的過壓效應 (Overpressure Effect)。在試驗中取得的過壓效應資料顯示，與用來估計噴射式起火中可燃量的暫時性散佈模型理論相符合，在試驗中也同時發現，無任何限制的矽甲烷自由性外洩會在開始洩漏後一至兩秒發生爆炸。

這次外洩試驗的結果很明顯地與先前其他實驗結果如 Factory Mutual Loss Prevention Data 7-0S 有很大的差異。在該實驗模型中推測約 30 秒的外洩會產生蒸汽雲式爆炸；同時也發現預期在矽甲烷噴射式外洩中，可燃量是與爆炸所產生的過壓成正比，進而與設施的安全預留距離成正比的

推測並未發生。

Uniform Fire Code (UFC)安全法規在 UFC 80, 80-1 章節中提供了矽甲烷及其他自燃性物質的使用綱要；該安全法規同時也提供了此類危險物質的戶外儲藏的建議預留距離；但其中只提供了小量儲藏的準則，並未說明半導體工業中矽甲烷用量持續增加時所面臨大量儲藏供應時的狀況。但此外洩實驗的資料顯示，CGA 協會已經發展出矽甲烷大量儲藏供應的設計標準，及矽甲烷使用風險評估綱要，可給矽甲烷氣體供應商、工程設計及施工單位、和矽甲烷最終使用者作為參考。CGA 此項研究計劃進行了 18 個月，包括兩個階段：

#### 第一階段：理論研究

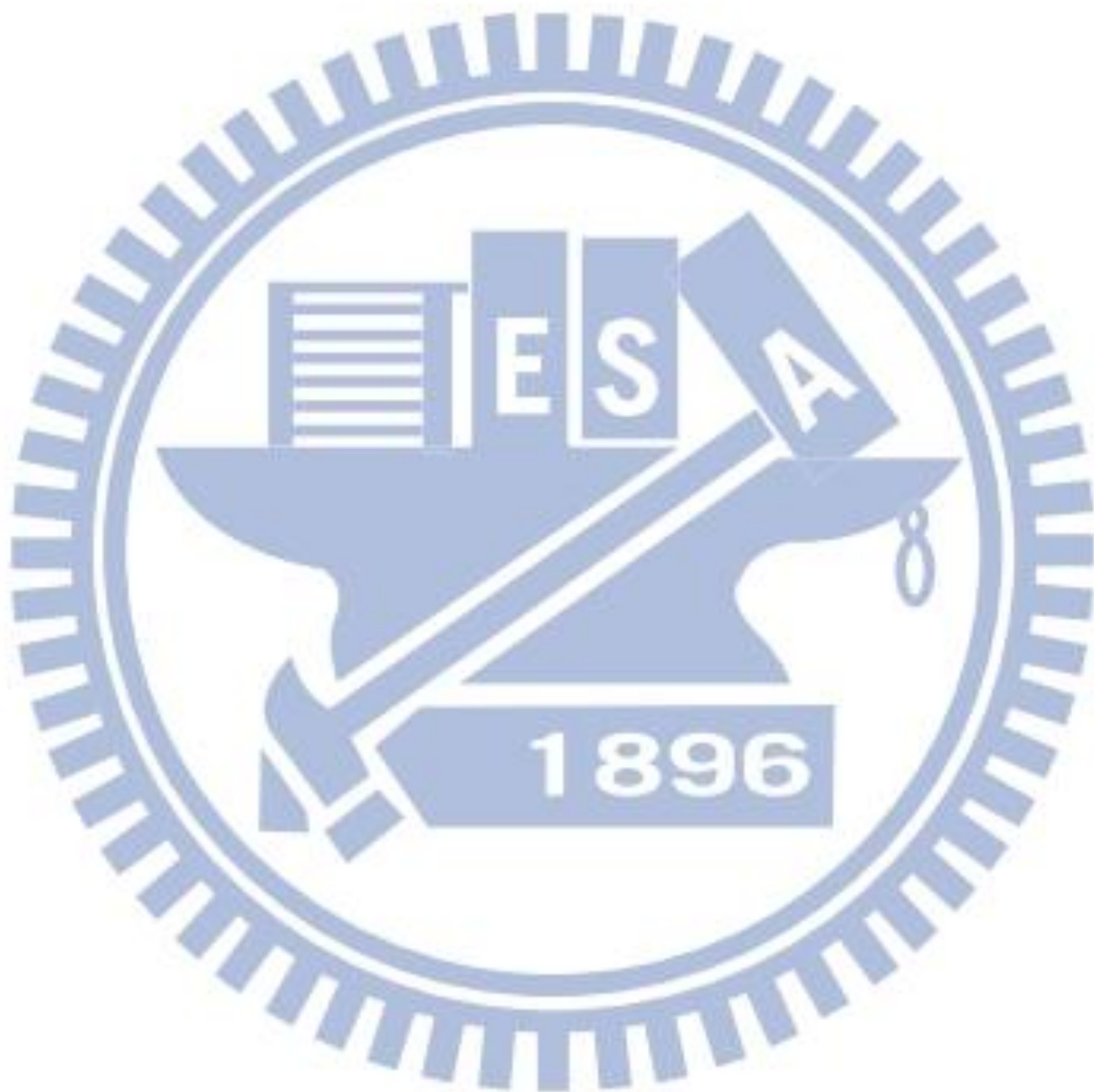
- (一)發展出大型矽甲烷測試系統的流程(Process Flow Diagram, PFD)設計及安裝方式。
- (二)整合 HAZOP 和 What If/Checklist 檢查方法來進行流程危險分析(Process Hazard Analysis, PHA)。
- (三)利用錯誤樹模型分析(Fault Tree Analysis, FTA)來決定各類矽甲烷外洩的可能機率。
- (四)利用噴射散佈模型、短暫性外洩模型、以及噴射火燄可燃性外洩量，來進行矽甲烷外洩的結果影響分析。

#### 第二階段：實驗工作

- (一)發現矽甲烷自由性外洩會導致無限制的蒸汽雲式爆炸(Unconfined Vapor Cloud Explosion, UVCE)，且在開始洩漏後一至兩秒爆出火花，而非以往 Factory Mutual Loss Privation Data 7-0S 研究模型所推

得之 30 秒。

(二)發現矽甲烷自由性外洩是否爆出火花，如外洩速度、壓力、外界溫度、溼度等的影響。



### 3.2.2 矽甲烷供應系統優缺點比較

表 5 矽甲烷供應系統優缺點比較

供應方式	優點	缺點	備註
氣瓶櫃	使用區量少(每瓶 10 公斤)	1. 更換頻率非常大 2. 儲存量大	
Tonner	1. 容積量約在 100 公斤或 470 公升 2. 無歧管且連接點少 3. 更換頻率約少氣瓶櫃 5 倍	1. 更換頻率約是 bundle 3 倍	500 公升以上屬高壓氣體設備，要經過檢查
Bundle	更換頻率明顯減少(平均用量約 2 星期一次)	1. 歧管多且連接點多，易造成洩漏 2. 現場放置量太大(使用及倍用共 56 支，約 560 公斤) 3. 更換有較多人為失誤潛在問題	因屬氣體集合裝置，非屬高壓氣體容器，不需經申請檢查，安全性堪慮
Trailer	儲存量大 更換頻率小 戶外獨立區域		

### 3.2.3 鋼瓶與拖車系統安全防護措施比較

表 6 鋼瓶與拖車系統安全防護措施比較

鋼 瓶	拖 車
容量 5,000 克 790 psig 鋼瓶	容量每支管 375,000 克, 一般為 8 支
室內儲存必須符合 UBC 要求	因為室外儲存不受 UBC 管制
室內儲存若是氣密系統存放只允許 50ft <sup>3</sup> 在許可之櫃子內可有 100%數量增加(UFC 表 8001.13A)	N/A
分開儲存量>2,000ft <sup>3</sup>	N/A
室外儲存最多每個位置體積量 10,000ft <sup>3</sup>	室外儲存最多每個位置體積量 10,000ft <sup>3</sup> 也許會有些差異
儲存位置距離生產線/街道及建築物依 UFC 表 8003.8	儲存位置距離生產線/街道及建築物為 25 ft
必須符合 Class I, Division2 之電氣防爆標準	必須符合 Class I, Division2 之電氣防爆標準
使用 0.01 吋限流孔	N/A 但是應提供限流孔
氣瓶櫃內接頭處須有 200 lpm 排氣速度且由緊急電力支援其排氣電源	開放空間不需排氣
使用專屬的掃氣(purge gas)系統	使用專屬的掃氣(purge gas)系統並有 Kirk Key 系統以強化重

	要系統
室外儲存須要警戒避免未經授權人員進入	用鏈條圍堵鎖上並與廠務保全系統結合
使用 CCTV 監視	使用 CCTV 監視
必須備有鋼瓶洩漏處理氣瓶櫃	N/A
管路串接以焊接及 VCR 方式	管路串接以焊接及 VCR 方式
消防灑水系統	水霧系統使用 UV 火警感知器及失效時之手動控制
氣體探測器	不需要
Burn Box, Wet Scrubber	Flare stack 火焰燃燒式煙囪

#### 3.2.4 由拖車大量洩漏之 FTA 分析結果

某大型研究針對運用失效模式與影響分析評估矽甲烷供應系統之安全性。該研究是依據 FMEA 進行矽甲烷供應系統相關危害之研究調查，將結果資料陳述與討論，如下[21]。

在失誤機率評量上，得知認同失誤機率在中等以上且超過50%以上只有「Pumping Line 管線阻塞」一項，認同失誤機率在30%以上有：

- (一) 鋼瓶作業翻覆
- (二) 鋼瓶作業碰撞
- (三) 鋼瓶作業拆錯使用中的氣瓶
- (四) Exhaust 無作動
- (五) Bellow/check valve 燒毀

以上五項，表示現況矽甲烷供應系統之失能風險仍高。失誤嚴重性評量上，從統計數字可以得知超過50%以上受訪者認為有財產損失超過10萬以上、生產損失超過停工一週以上、人員傷亡需要住院醫療之嚴重傷害的失效模式，包括有：

- (一) 鋼瓶作業種類錯誤
- (二) 鋼瓶作業翻覆
- (三) 鋼瓶作業碰撞
- (四) 鋼瓶作業拆錯使用中的氣瓶
- (五) 閥件鬆脫
- (六) Exhaust 無作動
- (七) Sprinkler 無作動
- (八) dry pump Shut Down
- (九) Pumping Line 管線阻塞
- (十) localscrubber管線堵塞，pump 故障
- (十一) localscrubber exhaust line 阻塞
- (十二) localscrubber O<sub>2</sub>測漏失效

等在中度以上之嚴重度共12 項。顯示以上12 項因子為矽甲烷供應系統危害之關鍵點。

光電業與半導體業之差異，在失誤機率評量上，有：

- (一) 鋼瓶作業翻覆
- (二) 鋼瓶作業碰撞
- (三) gasket (襯墊) 未更換

等三項失誤機率光電業高於半導體業，經訪問及查詢文獻得知在原物料使用量之需求光電業高於半導體業，相對人工操作更換頻率次數也較高。



在嚴重性評量上，於：

- 鋼瓶作業種類錯誤
- 鋼瓶作業碰撞
- 鋼瓶作業拆錯使用中的氣瓶
- 閥件鬆脫
- 鋼瓶連接器未鎖緊
- gasket (襯墊) 安裝不良
- gasket (襯墊) 未更換
- Exhaust 無作動
- Sprinkler 無作動
- dry pump Shut Down
- Pumping Line管線阻塞
- Bellow、check valve 燒毀
- local scrubber管線堵塞，pump 故障
- local scrubber exhaust line阻塞
- local scrubber O<sub>2</sub>測漏失效

等15項光電業高於半導體業，主因為使用量與更換頻率皆高。

在預防改善評量上，依據預防措施建議之選項，及作業標準程序，予以回應最佳化之管理建議。其中78.5%認同預防措施之建議，67.9%認同依建議事項進行作業管制，改善後再發生頻率幾乎不可能。另有建議增加表5所列之預防措施，以提供更加之安全保護。

本文之研究主要以矽甲烷供應系統之作業安全為研究對象，彙整過去已知發生之事故及相關案例，以FMEA 進行事故潛在發生因子的辨識與分析

發生風險。藉由失誤樹之推演，可以瞭解TFT-LCD廠矽甲烷事故的起始因素，並可提出防範措施。綜合研究調查結果，可歸納下列結論：

- 一、由光電業與半導體業之差異分析，發現TFT-LCD 廠矽甲烷事故發生原因主要為人員不安全的行為，如「鋼瓶作業翻覆」、「鋼瓶作業碰撞」、「gasket (襯墊) 未更換」等三項，且發生事故之頻率高於半導體業。主因為矽甲烷使用量之需求光電業高於半導體業，相對人工操作更換頻率高，發生事故之風險也相對高。
- 二、FMEA與FTA分析中，列舉出矽甲烷供應系統安全危害之關鍵點共16項。透過預防改善這些關鍵點並進行作業管制，可提供完善之安全保護。
- 三、由於TFT-LCD 廠危害辨識與分析之過程繁複，以及常未據實通報事故，使得事故發生頻率與嚴重性的資料不易獲得，建議建立產業的安全文化，以利相關工安資料之彙集。並運用FMEA 依不同階段找出可能使安全失效的因子，完整的收集及整理數據，以量化的數據為基礎，再透過FTA完整並且有系統的進行改善與管制。並可運用於TFT-LCD產業，以作為全產業危害鑑別及風險評估之工具，提升作業的安全性。

表 7 矽甲烷供應系統危害因素與預防建議

項次	危害因素	預 防 建 議
A01	鋼瓶作業種類錯誤	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 不相容氣體分開儲存</li> <li>2. 落實二人更換鋼瓶作業程序double check</li> <li>3. SiH<sub>4</sub>鋼瓶的顏色與其他的顏色不同</li> </ol>
A02	鋼瓶作業翻覆	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 鋼瓶設置防撞設備</li> <li>2. 每次作業依SOP進行搬運作業</li> <li>3. 定期實施搬運人員教育訓練</li> </ol>
A03	鋼瓶作業碰撞	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 鋼瓶設置防撞設備</li> <li>2. 每次作業依SOP進行搬運作業</li> <li>3. 定期實施搬運人員教育訓練</li> </ol>
A04	鋼瓶作業拆錯 使用中的氣瓶	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 設有安全鎖，關閉後才能更換</li> <li>2. 落實二人更換鋼瓶作業程序double check</li> <li>3. 確實穿戴PPE(個人防護具)</li> <li>4. 鋼瓶頸身塑膠套環辨識</li> </ol>
A11	閥件鬆脫	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 依進料檢驗程序檢查</li> <li>2. 每日點檢</li> <li>3. 確實穿戴PPE(個人防護具)</li> </ol>
A13	鋼瓶連接器未鎖緊	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 每日更換測漏</li> <li>2. UV IR Detector</li> <li>3. 設有Spronker</li> </ol>
A15	Gasket(襯墊) 安裝不良	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 每日更換測漏</li> <li>2. 確實穿戴PPE(個人防護具)</li> <li>3. 落實二人更換鋼瓶作業程序double check</li> </ol>

A16	Gasket(襯墊) 未更換	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 每日更換測漏</li> <li>2. 確實穿戴PPE(個人防護具)</li> <li>3. 落實二人更換鋼瓶作業程序double check</li> </ol>
A19	Exhaust 無動作	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 設置低流量警報</li> <li>2. 設置gas detector</li> <li>3. 設置自動灑水系統</li> <li>4. 設置壓差警報</li> <li>5. interlock機台無法運作</li> </ol>
A21	Sprinkler 無動作	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 確認水源有供應</li> <li>2. 確認水壓正常</li> <li>3. 確認閥件已開啟</li> </ol>
B01	Pumping Line dry Pump Shutdown	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 定期check pump之背壓</li> <li>2. chamber系統設有高壓警報及連鎖作動系統</li> <li>3. pump過高壓連鎖系統</li> </ol>
B02	Pumping Line 管線阻塞	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 定期check pump之背壓</li> <li>2. chamber系統設有高壓警報及連鎖關閉系統</li> <li>3. 定期保養及清潔管路</li> </ol>
B03	Pumping Line Bellow check valve 燒燬	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 不相容物質減量</li> <li>2. 增加 N<sub>2</sub> purge量</li> <li>3. 使用相容材質Oring</li> <li>4. check valve型式</li> <li>5. 定期更換</li> <li>6. 定期保養測漏</li> </ol>
C03	Local scrubber	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 管線採用防火材質</li> </ol>

	管線堵塞， pump故障	<ol style="list-style-type: none"> <li>2. 設有溫度偵測器</li> <li>3. 連鎖關閉裝置</li> <li>4. 設置緊急purge N<sub>2</sub></li> <li>5. 定期保養及清潔管路</li> </ol>
C04	Local scrubber exhaust line 阻塞	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 定期check管路系統之靜壓值</li> <li>2. 定期進行exhaust line之保養</li> <li>3. 連鎖關閉裝置</li> <li>4. 設置緊急purge N<sub>2</sub></li> </ol>
C06	Local scrubber O <sub>2</sub> 測漏失效	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 定期進行O<sub>2</sub> Detector校正</li> <li>2. 設有溫度偵測器</li> <li>3. 管線採防火材質</li> <li>4. 定期氨氣測漏</li> </ol>

一、由拖車大量洩漏之 FTA 分析結果

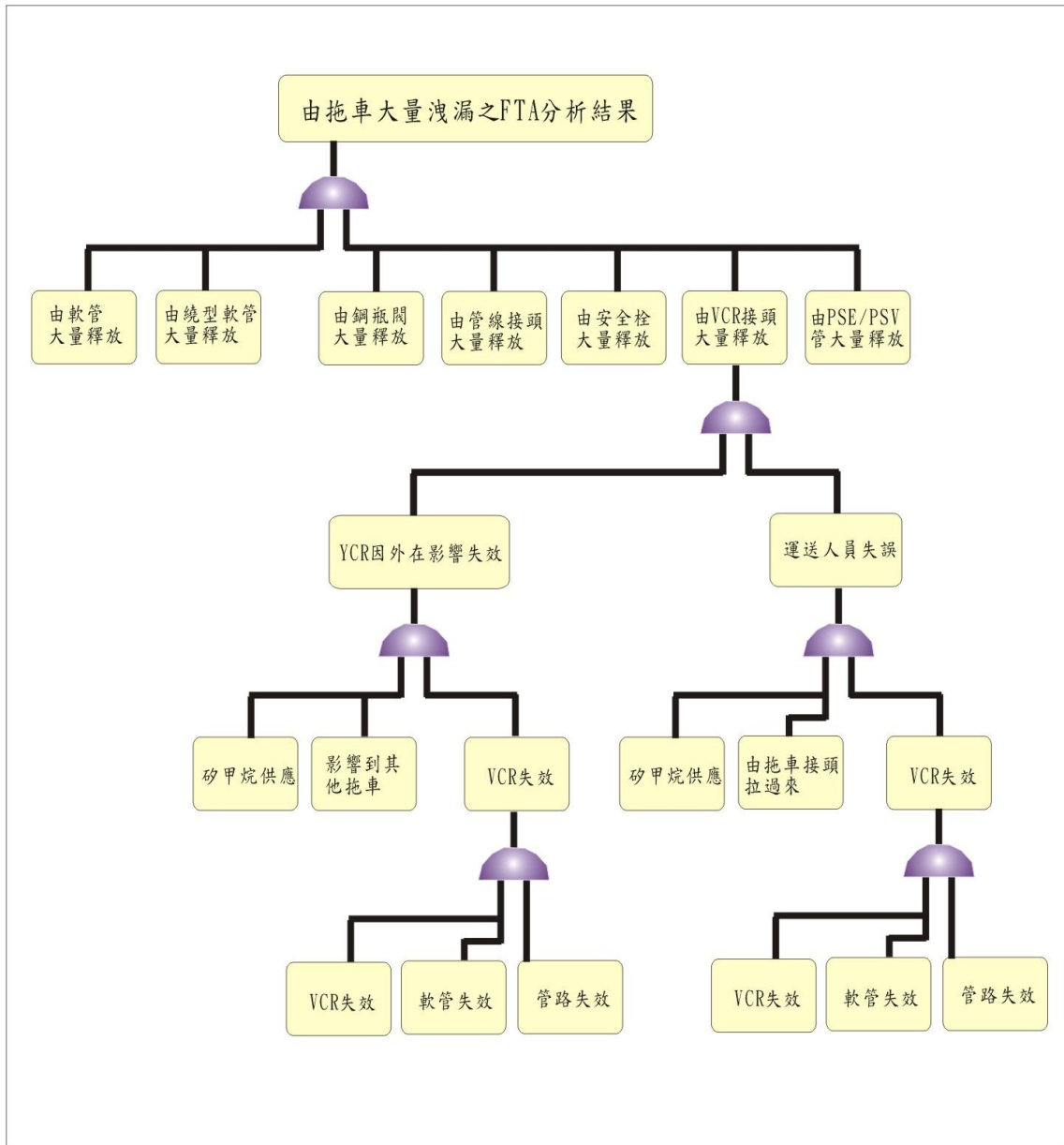


圖 19 拖車大量洩漏之 FTA 分析

## 二、SEMATECH 對矽甲烷鋼瓶與大量矽甲烷拖車比較

SEMATECH 研究報告歸納主要發現有：

- (一) 矽甲烷風險嚴重度是中度意外事件：大部份矽甲烷意外事故無法嚴重到啟動灑水器。因為系統設計上包括氣體及火警偵測，過流量，限流量閥，及流量或壓力偵測器可關閉矽甲烷流量。假如這些保護裝置不能預防矽甲烷洩漏。人為控制尤其是整個防護系統的重要條件。SEMATECH 調查 67% 為人員失誤結果。在一九八一至一九九三年，156 件矽甲烷意外只有一件造成嚴重的灼傷及兩件輕微受傷。而在一九八九至一九九三年間，意外事件嚴重性導致財產損生及或營業中斷，發生頻率是每年 5.2 次，平均損失美金每年 \$ 500,000 元。
- (二) 缺少共同標準的共識：舉例來說，矽甲烷供應用雙套管是否較單管安全？多少氣體洗淨(purge)次數在開放管線時需要？兩階段壓力調節是否較單一階段調節器安全？在輸送調節器下游端是否需高壓力元件。
- (三) 法規需要更新：如 U F C Article 51 及 80，或 UBC chapter 9 及 NFPA 318 針對自燃性氣體儲存及控制，因為有許多不同的法律上警告，因此每一種警示必須非常小心。許多工廠將矽甲烷鋼瓶存放在室內，室內每個氣瓶櫃不可存放大於一支矽甲烷鋼瓶。NFPA 318 要求單一氣瓶儲存，但不是佳儲存方案。因此 NFPA 318 要求戶外儲存及供應。
- (四) HPM 系統維護是重要的：維護保養計劃延伸至矽甲烷設施，危害性物質管理計劃及一般製程安全檢討與調查變異狀況。

表 8 SEMATECH 對矽甲烷鋼瓶與大量矽甲烷拖車比較

鋼 瓶	拖 車
容量 5000 克, 790psig 鋼瓶	容量每隻管 375,000 克, 一般每個模 組 8 隻
室內儲存必須符合 UBC 要求	因為室外儲存不受 UBC 管制
室內儲存若是密閉系統存放只允許 50ft <sup>3</sup> 在許可之櫃子內可有 100% 數量增加(UFC 表 8001, 13A)	N/A
室內儲存若是非密閉系統只允許 10ft <sup>3</sup> 在許可之櫃子內可有 100% 數量增加(UFC 表 8001, 13A)	N/A
分開儲存矽甲烷量>2000ft <sup>3</sup>	N/A
室外儲存最多每個位置氣體體積 10,000ft <sup>3</sup>	室外儲存最多每個位置氣體體積 10,000ft <sup>3</sup> 也許會有些差異
儲存位置距離生產線街道及建築物 依 UFC 表 8003.8	儲存位置距離生產線街道及建築物 25ft
必須符合 Class I , Division 2 之電器防爆標準	必須符合 Class I , Division 2 之電器防爆標準
如果在氣瓶櫃內接頭處必須有 200lfpm 排氣速度且由緊急電力支援其排氣	開放空間不須排氣
使用 0.01 吋限流孔	N/A



使用專屬的氮氣作為充氣之氣體	使用專屬的氮氣作為充氣之氣體 並有 Kirk Key 系統以強化重要系統
室外儲存需要警戒避免未經授權人員進入	用鍊條圍堵體鎖上並與廠務保全系統結合
使用錄影機監視	使用錄影機監視
必須備有鋼瓶洩漏處 氣瓶櫃	N/A
焊接及 VCR 銜接管路	焊接及 VCR 銜接管路
消防撒水系統	水霧系統使用 UV 火警感知器 及失效時之手動控制
燃燒器(Burn Box)溼式水洗機	火燄燃燒式煙囪
氣體監視器	不需要
傳送管線遮蔽及雙重套管理	遮蔽是必要的

## 第四章 結果與分析

化學物槽車所載運之物品，大部分具有高危險性，如因槽車管理不當，或安全性設計不足或因駕駛不當，或因路況不熟，而致意外事故，近年來已發生多起槽車翻車事故，對於道路兩旁住家的安全及環境造成嚴重的威脅，所幸在消防單位、環保單位緊急應變得宜下均能化險為夷，惟廠商應妥善管理化學物質運輸車輛及提升其安全性設計，並要求司機小心駕駛，以免對運輸路線沿線之住家及環境造成潛在危機，而致增加社會成本的支出。

### 4.1 矽甲烷槽車作業安全分析

化學槽車載送化學品的槽罐及車輛均需有適當的標示，且應考量下列幾點：

- 一、化學物質的包裝和標示
- 二、運輸儲槽的裝載和定位
- 三、車輛的標示和文件

錯誤的標示會造成嚴重的後果，宜特別小心。另外槽車駕駛座和儲槽間需有防火簾幕，照明用電流的電壓不可超過 24 伏特，必要時應切斷電池電流。槽車應備有適當的緊急設備，包括工具箱、緊急照明、急救設備、防護衣和呼吸面具等，同時攜帶的滅火器需與所載運的物質相容，並應有標示牌說明化學品的危害性及緊急時所應採取的行動。有些化學物質不允許用一般槽車載送，需有特殊的設計，方可利用公路運輸。例如運送聚合性物質時特別的設計，包括使用絕緣槽體和防聚合劑；運送過氧化氫需用

鋁或不銹鋼槽體時，槽車上不可有會與過氧化氫反應的木頭或潤滑劑，同時必須備有水槽以處理意外事故；在運送有機過氧化物則需使用具保冷效果的槽體，以降低因其不穩定性質，且液體管線接頭處需配有快速關閉的內部閥，蒸氣管線接頭處需有溢流閥或快速關閉的內部閥；其他像溴則必須置於鉛襯的不銹鋼槽內運送，烷基鉛則需置於外部有特別保護的儲槽運送，因此槽車的結構需要特殊性設計。

而矽甲烷外洩若沒有立即引燃，管線便會切換至廢棄處理室進行處理，但這切換的過程中會產生短暫的流速中斷，即造成矽甲烷延遲引燃的發生，引燃位置會在排放口，此引燃足夠去引燃周遭未反應的矽甲烷而造成一個小爆炸。觀察以上最初引燃的位置是在下游噴流中心，而不是噴流的邊界，表示引燃核心必須發生在矽甲烷與空氣混合的中心點。由圖五可以看出不同排放口徑之無因次的引燃距離(定義為引燃距離對排放口直徑的比值)與矽甲烷的流速都呈同一線性關聯，與排放口徑無關，表示控制矽甲烷外洩至空氣中立即引燃的機制對不同排放口徑是相同的[25]。由此可知，在矽甲烷的槽車安全設計上，管徑的影響較少，影響較大的則是流速因素，可做為安全設計上的一大考量。

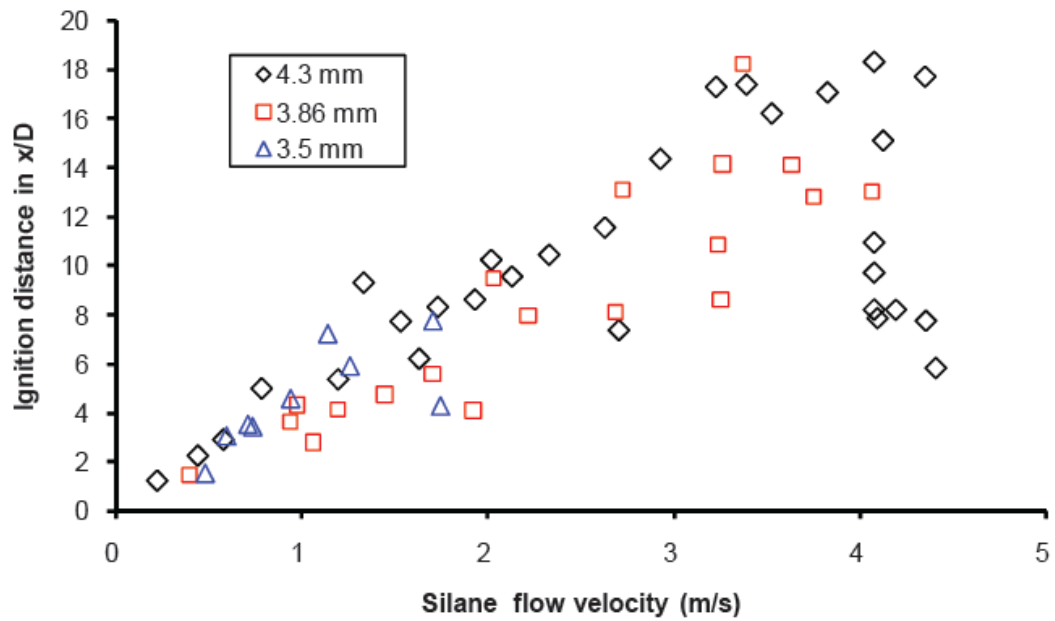


圖 20 不同排放口徑之立即引燃的引燃位置與矽甲烷流速的關係[25]

#### 4.2 矽甲烷槽車作業防災策略

大量使用矽甲烷之設施目前被研究使用因其可以減少人機接觸的系統機會，另一重要優點是可減少原料及人工成本，同時矽甲烷拖車具有之工程控制設施依 NFPA68 爆燃洩壓指引，NFPA69 爆炸預防，NFPA70/500 電力法規。1994 年版 UFC 80-1 儲存 供應及使用矽甲烷及其混合物，在 8003.8 節允許灑水器、爆炸控制、機械排氣、電器防爆、緊急電力供應及如果儲存量大於 2000ft<sup>3</sup>，則需要分開的建築物且過壓力時必須與主建築物有足夠距離。若果矽甲烷或其混合物超過體積大於 2%則應符合 UFC No. 80-1。

槽車與鋼瓶系統之設計除純度外，在系統及元件上是相似的開放空間以防火牆區隔重要閥及設施，對於進入拖車之管制、水霧系統保護、三個

UV 偵測器、專屬之氮氣供應及圍籬及監視器等警衛系統。另外使用氮氣之管線測漏及排氣管使用氮氣灌充及由煙囪排出。

槽車事故之防災對策可從安全設計、安全裝置及安全管理面三方面著手，安全設計即指槽體安全結構之設計，安全裝置包括槽車預防事故所需要之各種裝置如安全閥、防焰器、接地裝置、緊急停止卸料裝置、防止駛離裝置、自動灑水系統等，安全管理則包含設備及人員之各種安全管理措施規劃及執行。其詳細敘述如所示下：

#### 4.2.1 槽車安全設計

槽車槽體之結構對於槽車安全性至為重要，其影響槽體是否能夠承受內容物所產生之壓力而不致發生破裂造成內容物外洩引起中毒、火災、爆炸、污染環境等危害。

槽車槽體結構之安全性從設計之初就必須予以考慮，其考量之要素為

- 一、槽體材質種類及加工方法
- 二、槽體厚度及強度
- 三、槽內防波板；我國對於槽車槽體結構、槽體材質種類及加工方法設計規範見於 CNS 7248、CNS 2947、CNS 4271、CNS 2673、CNS 3828。

其中 CNS 7248 為液化石油氣汽車運輸槽體，其重要規範項目如下：

#### ■ CNS7248 3.2

校對擬用材料記號及製鋼爐號之刻印或噴印與材料證明書應相符，並由施工負責人簽認。若需分割處理時應將材質符號及批號，刻印或噴寫於

被分割之鋼板上以資識別。

■CNS7248 2.3

胴體及端板實測厚度應在算出最小必要厚度以上，且胴體實測厚度不得小於 6mm。

■CNS7248 3.2

材料外表應無疊層、龜裂、深痕、顯著銹蝕或其他有害之缺陷。

■CNS7248 3.8.2

端板成形之公差應在端板凸緣部位公稱內徑之 1.25%以下。

■CNS7248 3.16

熔接部開槽形狀及尺寸與構造詳圖相符。

■CNS7248 3.17

胴體成形後之真圓度不得超過其內徑 1%。

■CNS7248 2.7

1. 胴體縱向熔接縫位置不得在胴體圓心與鉛垂線最低點連線的左右角度 20° 以內。
2. 鄰近之兩條胴體縱向熔接縫距離，或胴體縱向熔接縫與端板熔接縫距離應保持板厚 5 倍以上

■CNS7248 3.9

縱向對接熔接縫偏位差應在  $1/4 t$  (最大 3.2mm) 以下。

■CNS7248 3.9

周向對接熔接縫偏位差應在  $1/4 t$  (最大 5mm) 以下。

■CNS7248 3.16.9

檢查熔接部外表不得有裂痕、熔入不良、重疊、過熔低陷等有害缺陷，且鐸冠應在 2mm 以下。

#### ■CNS7248 4.2.1

槽體應在縱向熔接縫線上假焊一塊試驗板於同條件下繼續熔接，並經槽體同條件之熱處理，以供機械性能試驗使用。該熱處理或性能試驗結果須經施工負責人簽章。

#### ■CNS7248 4.2.3

1. 試驗片依 CNS 12455 規定形狀、尺寸裁取及實施拉伸試驗。
2. 試驗結果其抗拉強度或降伏點在計算槽體厚度所用之抗拉強度或降伏點以上為合格。

#### ■CNS7248 4.2

1. 試驗片為 CNS 3940 尺寸，依 CNS 12676 模彎試驗法實施正面、反面及側面彎曲試驗。
2. 彎曲至規定的彎曲半徑後，結果無產生 3mm 以上裂痕為合格。

#### ■CNS7248 4.2

1. 機械性能試驗結果不合格者，符合再試驗條件得實施再試驗。
2. 再試驗片尺寸、試驗方法及結果應符合各該試驗合格規定。

#### ■CNS7248 4.3

1. 槽體縱向及周向熔接縫全部長度應實施放射線檢查。
2. 縱向及周向放射線檢查結果屬於二級以上缺陷為合格

#### ■CNS7248 4.3

1. 抗拉強度 58kgf/mm<sup>2</sup> 以上或厚度 25mm 以上碳鋼製槽體熱處理後，表面應依磁粒檢測法實施檢查。
2. 承受壓力之熔接縫中屬 A 類, B 類及 D 類者應全長磁粉探傷檢查。
3. 實施 MT 檢測結果不得有任何缺陷，檢查紀錄須由認可之判片人員及施工負責人簽章。

#### ■CNS7248 4.3

施行非破壞檢測相關人員資格：具有主管機關核發之執照。

■CNS7248 3.18.1

當槽體完成所有熔接作業及經非破壞檢查合格後，應置於爐內施行熔接後熱處理。

■CNS7248 3.18.3

熱處理之保持溫度非調質鋼為  $625\pm 22^{\circ}\text{C}$ ；調質鋼為回火溫度下  $50^{\circ}\text{C}$ ；母材厚度 6~12mm 保持時間為 0.5 小時。

■CNS7248 3.18.4

熱處理自動記錄曲線應清晰可直接判讀保持溫度及時間，並註明槽體編號及厚度，實施紀錄須經施工負責人簽章。

#### 4.2.2 槽車安全裝置

槽車設置安全裝置可有效減少事故發生之機會或將事故所造成之危害降至最低，而其安全裝置之種類依其用途可分為 1. 槽車進行裝卸作業時所裝設之作業安全裝置（如緊急停止卸料裝置、防止駛離裝置等）；2. 裝設於槽體上之槽體安全裝置（如安全閥、防焰器等）兩大類，其說明如下：

##### 一、裝卸作業安全裝置

槽車在進行裝卸作業時，為防止卸料時所可能產生的危害，應設置相關之安全衛生設備及消防設施其敘述如下：

##### (一)安全連鎖系統：

將檢出結果與卸料幫浦連鎖，當接地效果不佳時，則顯示紅燈，卸料



泵浦便無法啟動。

(二) 緊急停止卸料裝置：

萬一卸料蛇管破裂或其它原因，導致物料外洩時，除了現場可以緊急停止卸料外，為防止洩漏量擴大，人員進入卸料區之危險，可在 20 m 處安全之場所，設置緊急停止按鈕。

(三) 卸料平衡管：

防止因壓力異常造成安全閥跳脫，導致氣體外洩之危險，設置卸料平衡管可回收氣體並可避免揮發性氣體逸散。

(四) 可燃性氣體偵測器

於易卸漏處如槽車卸料泵浦端，設置可燃性氣體偵測器，並將警報系統與控制室連接。

(五) 防止駛離裝置

防止停車後因車體滑動而導致危險，藉由防止駛離裝置將車體緊急自動油門反鎖，以避免車體移動。

(六) 自動灑水系統

如有熱源加熱於槽體或槽體本身發生燃燒，自動灑水系統會作動以降低槽體之溫度避免災害擴大，此系統除了現場可手動操作外，並需在 20 m 處設緊急啟動裝置，以供緊急使用。

(七) 等電位聯結與接地裝置

槽車進行裝卸作業時極容易產生靜電而發生危險，裝置等電位聯結與接地裝置，可將靜電荷導入大地予以消除。

## 二、槽體安全裝置

槽體安全裝置設計及設置規範見於中國國家標準 (CNS) 7248 及危險性機械及設備安全檢查規則。其種類、型式、功能及用途如下表所示。

表 9 槽體安全裝置之種類、型式、功能及用途彙整表

安全裝置種類	型式	功能及用途
安全閥	內裝彈簧式	當槽內壓力過大，安全閥即會作動將過量之氣體洩出，降低壓力至安全範圍，以避免槽體因過壓而發生危險。
安全監控儀錶	液位計（滑管式或旋臂式）壓力錶、溫度計	監視槽內之液位、溫度及壓力狀態。
緊急遮斷閥	鋼絲操作式或油壓操作式	在發生緊急事故時（如槽車發生撞擊、翻車等）可將槽體所有進出口封閉以避免內容物（氣相、液相）洩出。
滅火器	乾粉滅火器（滅火效能值如 BC 者應在 B-10 以上，ABC 者在 B-12 以上）	處理小型火災，避免災害進一步擴大。
接地裝置	無	防止靜電所造成之危害。
防焰器	離心式	防止槽車排氣管放出火花形成點火源而發生危險。

裝設位置及構造如下圖所示。

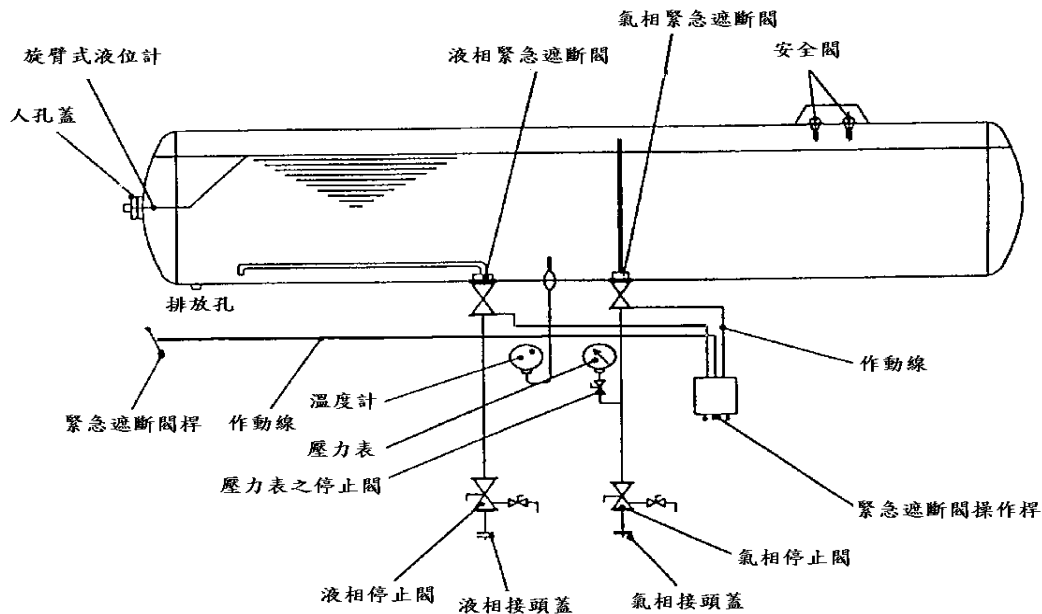


圖 21 槽體安全裝置裝設位置及構造圖

在連結器的設計方面，依據相關文獻[25]，其研發的車用安全連結器可分為三個主要部份，分別為計量機側、汽車側與將前二者連結與分離的機構。由於車用安全連結器本身用途上的限制，計量機側與汽車側勢必須要分開設計成兩個元件，因此在計量機側與汽車側的連結機構方面，決定採用螺紋接合，使安全連結器除了因達到其分離條件而分離外，在必要的時候亦可方便地利用人力將其分離而進行檢查或零件汰換。在分離機構的設計方面，利用一軸承的鋼球，同時配合計量機側外形尺寸的設計，將鋼球頂入汽車側的溝槽內完成連結或使鋼球脫離汽車側溝槽完成分離動作。車用安全連結器的設計構想示意圖如下圖所示。其作動原理為，初始狀態下計量機側與汽車側連結在一起，兩側的截止閥利用前端頂桿的干涉而被頂開，液化石油氣流動呈通路狀態。當汽車端加氣軟管對安全連結器施以拉力時，套筒內之彈簧受到壓縮，因此軸承部連同汽車側相對於計量機側

產生位移，若位移量使得軸承部移動到計量機側外形所設計的分離部位時，軸承部鋼球便向外脫出且與汽車側分離，安全聯結器分離且在瞬時計量機側與汽車側內的截止閥關閉，阻絕液化石油氣通路。

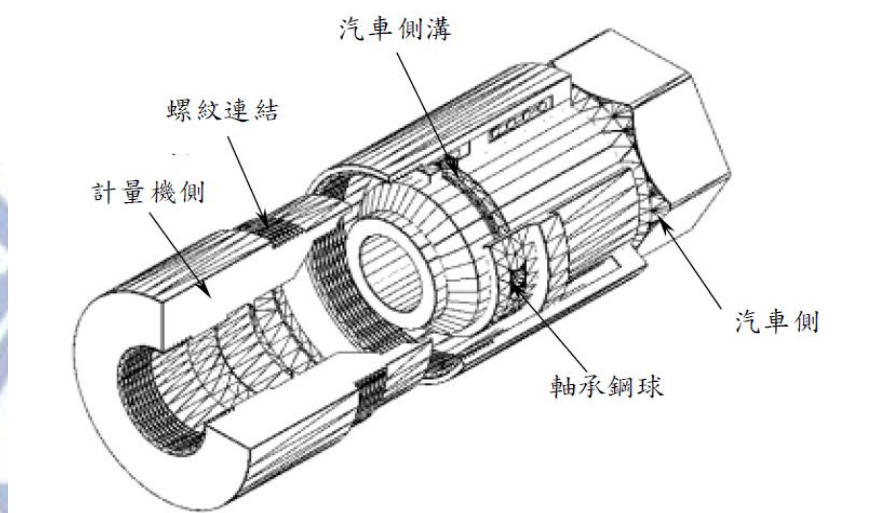


圖 22 車用安全連結器設計簡圖(一)

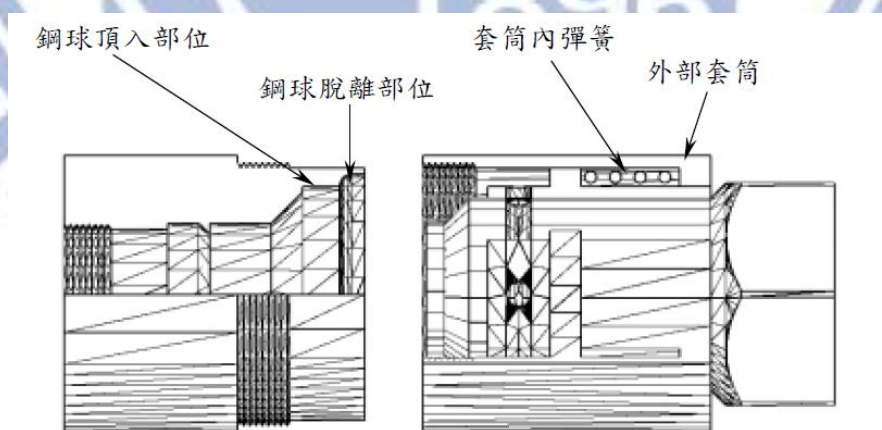


圖 23 車用安全連結器設計簡圖(二)

在零組件設計上，PT1" 及 PT2" 槽車用安全連結器的零組件設計將要確定各零組件的尺寸及製造的材料等機械性質，其中考慮的因素包括製造

的可行性、加工的方法、公差的訂定、安全因素的選用及製作的成本等等，同時也要將中國國家標準 CNS 中對所設計各零組件的相關法規、規範及市面上現有零組件的規格品納入設計的考量中，期望設計製造出性能符合國家標準且成本低廉的安全連結器。

將安全連結器的零組件設計分為九個部份：

- 一、設計參數的決定
- 二、槽車側接頭設計
- 三、灌裝機側接頭設計
- 四、軸承部 I 設計
- 五、軸承部 II 設計
- 六、外部套筒設計
- 七、截止閥設計
- 八、壓縮彈簧的選用
- 九、密封設計

在安全連結器性能測試方面，根據高壓氣體勞工安全規則暨相關基準的規定，高壓氣體設備應通過氣密試驗與耐壓試驗兩項定性性能測試的要求，所以本計畫設計的槽車安全連結器須進行這兩項性能試驗，此外在性能測試項目中另外加上拉伸試驗，將所測得的數據繪製成本研究，研發之槽車安全連結器的分離曲線圖，作為其分離性能的依據，以下便對氣密、耐壓及拉伸試驗設備及方法分別敘述之。

## 一、 氣密試驗

整個氣密實驗實驗方法則依據「高壓氣體勞工安全規則暨相關基準」第四十五條(高壓氣體設備耐壓試驗及氣密試驗)「氣密試驗壓力基準之常用壓力，係指在使用於該設備等之最高使用壓力、氣密試驗以使用空氣或其他無危險性氣體之氣壓實施為原則、氣密試驗以不致使設備引起脆性破壞之虞之溫度實施、氣密試驗壓力應使用常用壓力以上之壓力，漏洩之確認應於保持規定壓力 10 分鐘後實施、氣密試驗應於氣密試驗壓力下無漏洩等異常者為合格」，CNS8069(液化石油氣灌裝場設施安全標準)第六項高壓設備提到「管線接頭及閥等，施行設計壓力 1.1 倍之氣密試驗。」，CNS12861(液化石油氣氣罐車用橡皮管聯結器)第四項試驗及檢查提到「氣密試驗以空氣或惰性氣體加壓 24 kgf/cm<sup>2</sup> 以上時，不得有漏氣。」

## 二、耐壓試驗

整個耐壓實驗方法則依據「高壓氣體勞工安全規則暨相關基準」第四十五條(高壓氣體設備耐壓試驗及氣密試驗)「耐壓試驗壓力基準之常用壓力，係指在使用於該設備等之最高使用壓力、耐壓試驗以水壓實施為原則、耐壓試驗以不致使設備引起脆性破壞之虞之溫度實施、耐壓試驗壓力應在常用壓力之1.5 倍以上，規定壓力保持時間為5~20 分鐘，但經中央主管機關指定者，從其規定、耐壓試驗應在耐壓試驗壓力下確認無膨脹、伸長、漏洩等異常者為合格」，CNS8069(液化石油氣灌裝場設施安全標準)第六項高壓設備提到「管線接頭及閥等，應施行最大使用壓力1.5 倍之水壓試驗。」，CNS12861(液化石油氣氣罐車用橡皮管聯結器)第四項試驗及檢查提到「耐壓試驗以水加壓36kgf/cm<sup>2</sup> 以上時，不得有異常。」

### 三、 拉伸試驗

整個拉伸實驗實驗方法則為對槽車安全連結器不同內壓條件做拉伸試驗，作為其分離性能的依據。在對不同內壓條件的拉伸試驗中，首先利用水壓機測試安全連結器無軸向拉力時分離所須的內壓值三次，然後將內壓為零到分離內壓平均值之間三等分，對各等分點的內壓情形進行拉伸試驗，並且每種內壓值做三次拉伸，依此整理出軸向拉力與內壓間的關係。

而安全連結器的設計原則為：

1. 安全連結器組裝完成後，建議將其外部包覆人造橡膠外層，以避免水氣、油氣進入與表面的損傷，進一步達到防蝕的目的。
2. 槽車側接頭與灌裝機側接頭之管件內部，建議加以防蝕處理，達到防蝕功效。
3. 安全連結器在使用過程中，可能會有組裝不易的情形發生，建議製作簡易的手工具來輔助安裝。
4. 針對槽車灌裝用之安全連結器，僅適用於口徑PT1" 及PT2" 之灌裝軟管，若日後要將研究成果應用於其它用途，設計時須重新計算與分析，但其機構原理仍可採用。
5. 安全連結器所進行的實驗測試於不同介質間將有差異、加氣機泵提供液化石油氣充填壓力的情況、加氣軟管受到拉扯的實際情況等亦可能與實驗有不同，為了確認安全連結器的實用性，建議商借液化石油氣分裝場的實際設備，進行試驗操作。
6. 建議於槽車中加裝「防止駛離裝置」俗稱第三車，其裝置可搭配安全連結器使用，在灌裝作業時，以氣動式剎車裝置將槽車固定住，同樣可防止灌裝作業中槽車駛離，達到雙重安全的保障。
7. 建議可於灌裝島上灌裝輸送管線及槽體內之液、氣相緊遮斷閥中加裝超

流閥，使其於流量異常時會自動關閉，保障灌裝作業的安全。

8. 連結器若缺乏保養，事故發生時也無法發揮其效能，因此為提高使用時的安全性，建議訂定裝置之自動檢查項目、方法及檢修週期，使其能在適時發揮效用。

#### 4.2.3 槽車安全管理

構築槽車安全管理系統，實施槽車安全管理對於事故之預防亦有極佳之效果，槽車之安全管理系統架構如下圖所示，可分為九大項目其分別為一、安全檢查制度；二、維修保養制度；三、監控作業；四、儲運作業安全管理；五、作業安全防護；六、緊急應變制度；七、防污作業；八、人員教育訓練；九、調查分析與事故模擬。其敘述如下：

##### 一、安全檢查制度

實施槽車定期檢查及作業前安全檢點，其檢查項目為

- (一) 槽體抗壓檢測
- (二) 槽體脆裂化檢測
- (三) 車輪胎紋及胎壓檢測
- (四) 消防及安全裝置定期檢查
- (五) 一般車況檢查

##### 二、維修保養制度

針對槽車發生洩漏、安全裝置故障或其它異常狀況進行故障排除作業，並定期進廠檢修調校，使車況維持在最佳狀態。



### 三、監控作業

對於槽車槽體內之溫度、壓力及液位，進行連續性之監控作業，並於車上裝設 GIS/GPS (Global Information System / Global Position System) 監控系統，可隨時瞭解車體運輸狀況，以及道路變更資料，可提高工作效率與提供安全保障建議。

### 四、作業安全管理

制定標準作業程序，槽車作業必須遵循裝卸、儲存及運輸作業規範，同時適當的規劃槽車行經路線與行車時段，盡量降低人車曝露之機會，避免或減少槽車經過大都會區、鄉鎮等擁有高密度人口之地區。此外於槽車上配置無線通訊系統，以備一般連絡及緊急求援之用。

### 五、作業安全防護

進行槽車之裝卸、儲存、運輸、維修、救災、污染防治等作業時，作業人員應裝配個人安全防護具（如呼吸防護具、防護手套、安全鞋、防護衣等）及攜帶安全防護工具（如特殊作業用工具、滅火器、警告標誌、緊急處理操作手冊等）並進行作業安全防護程序（如明火管制、交通管制、通風換氣、接地等）以防止危害之發生及擴大。

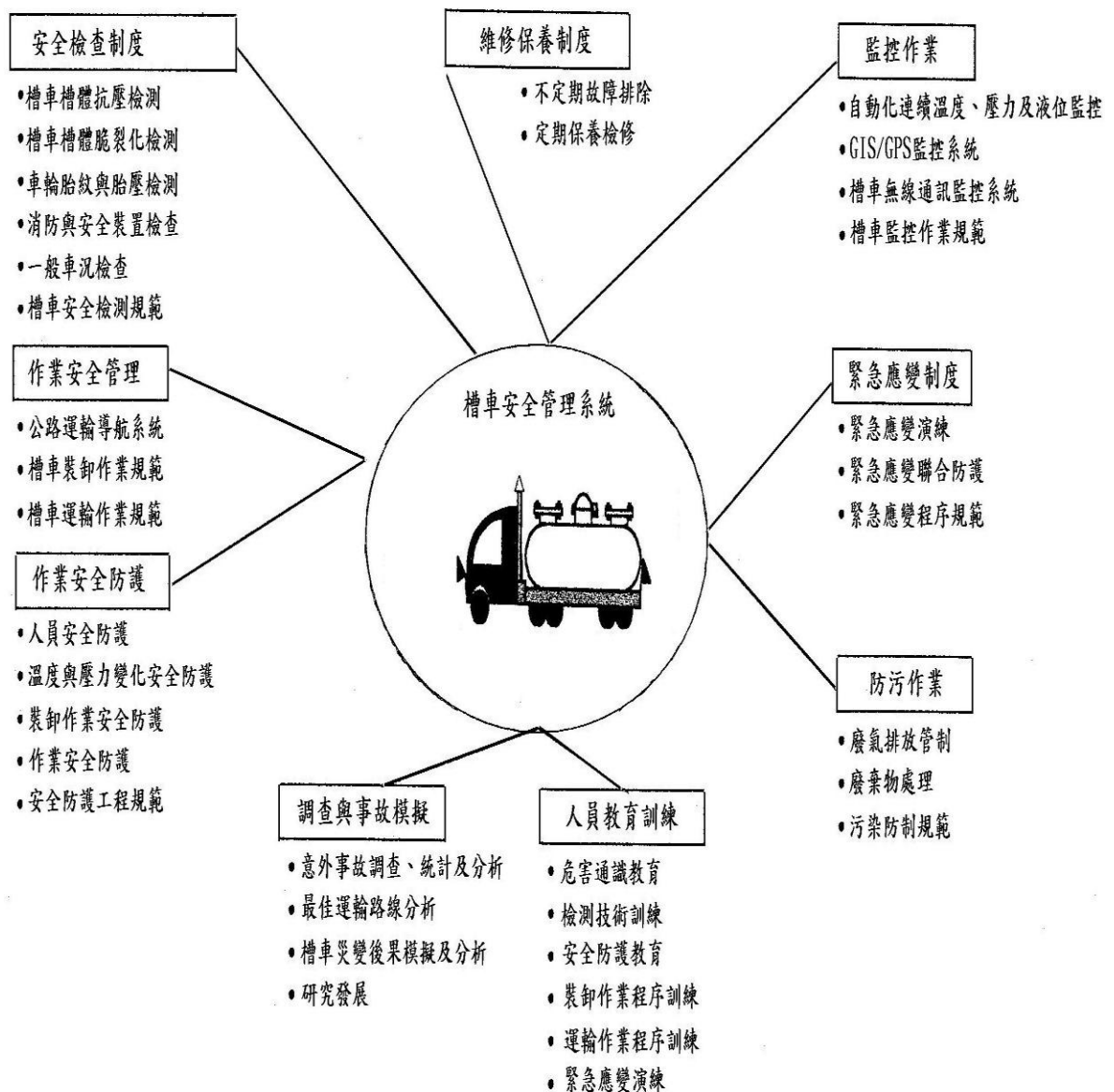


圖 24 槽車安全管理系統架構圖

## 六、緊急應變制度

制定緊急應變計畫成立化學災害聯防小組並熟練化災預防演練模式

(如國內的 OSPCT)，使意外發生時能即刻處理現場，避免災害擴大。

## 七、防污作業

進行污染防制及處理等作業，以減少對環境所造成之衝擊。

## 八、人員教育訓練

高壓氣體或危險物質的輸送人員，應具備車輛駕駛技術、安全知識及危機處理能力，並須受過高壓氣體洩漏處理及滅火設施等專業訓練合格，始可擔任之。

## 九、調查分析與事故模擬

對於槽車發生外洩、火災、爆炸及其它意外事故，進行調查、評估、災變後果模擬及分析以認知及瞭解公路運輸危險物品可能造成之影響與風險程度，分析造成事故之可能原因、評估影響範圍及風險程度，藉以採取減少事故風險之方法與措施，進而實行緊急應變，降低因公路運輸危險物品洩漏事故所產生人員傷害、財產損失及環境污染。

### 4.3 矽甲烷運送規範法規分析

經蒐集國內法規、國際規範、標準和相關文獻、專業書刊各方矽甲烷儲存及處理作業之相關資訊，彙整結果如下：

表 10 矽甲烷儲存及處理國內外規範

規範 來源	規範名稱	備註
國 內 法 規	勞工安全衛生設施規則	
	高壓氣體勞工安全規則	
	危險性工作場所審查暨檢查辦法	
	勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準	
	危險物及有害物標示及通識規則	
	道路危險物品運送人員專業訓練管理辦法	
	毒性化學物質管理法	
	消防法	
	公共危險物品及可燃性高壓氣體設置標準 暨安全管理辦法	
	可燃性高壓氣體儲存場所防爆牆設置基準	
國 外 法 規	National Fire Protection Association (NFPA)	半導體生產設施的防 火標準—318
	Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI) S2、S10、S18	半導體製造設備 (S2)、風險評估

		(S10)、矽甲烷族氣體處理(S18)之安全衛生及環保標準
	Factory Mutual Loss Prevention (FM) 7-7	半導體生產設施
	Compressed Gas Association(CGA) G-13-2006	矽甲烷及其混合氣體的儲存與運輸

#### 4.3.1 法規分析

##### 一、勞工安全衛生設施規則

(一)第 106 條不得任意灌裝或轉裝，許多氣體原料在國外製造，進口後在國內進行灌裝作業，如此對業界是非常窒礙難行。

(二)第 108 條第 8 款通路面積以確保貯存處面積百分之二十以上為原則，若儲存設備於室內現實狀況難以做到。

(三)第 185-1 條第 2、3 款

第 2 款：氣體容器之閥門應具有限制最大流率之流率限制孔。此項有實際執行之困難，在運送卸料時可要求一定要安裝，但灌裝分裝時，建議可由提供其他防止洩漏之安全管理做法或輔助措施來取代 RFO 的安裝。

第 3 款：氣體儲存於室外安全處所，如必須於室內儲存者，應置於有效通風換氣之處所，使用時應置氣瓶櫃內。但若儲存容量超過 45 公升鋼瓶就無法放入氣瓶內，應有其他配套之安全防護措施。

## 二、高壓氣體勞工安全規則

- (一)矽甲烷在本法規屬可燃性氣體和毒性氣體，同時為 2 種身份之特性並無在本法內相關製造、供應、儲存、運輸及作為消費時安全設施被提出討論和規範，建議應對矽甲烷作一完整之分析研究，是否以現有之法規內容足夠涵蓋所有安全考量面，亦或獨立出來探討之必要性。
- (二)矽甲烷亦屬毒性氣體，根據規定使用及消費之毒性氣體不能直接排出，必須要經由除害設備處理，但業界常見之 ISO 模組及槽車上均有壓力釋放安全裝置(PRD)，一但做動將直接洩放，現況無法導入除害設備內，如何兼顧二者之需求是值得考量的。

## 三、環境保護法-毒性化學物質管理法

因矽甲烷屬毒性氣體，若遇上述 2.2 情形，直接排放到大氣中，對於環境污染及人體健康影響之風險性及嚴重度，也未見有相關規範及討論，故未來安全規範立法時應納入環保主管機關參與，才能完整地考量到矽甲烷異常排放時後續完善之除害工作。

## 四、消防相關法規

- (一)公共危險物品及可燃性高壓氣體設置標準暨安全管理辦法，由於四氫化矽國內從製造、充填、儲存、使用的供應鏈可預見的未來將日趨成熟，使得四氫化矽在該管理辦法中已經無法被涵蓋到且可能會有無法可管的窘境，因此，如同本報告前述提到的矽甲烷為特殊高度危險物品其高風險的本質，對於是否應該針對矽甲烷量身訂立管理法規；著實有研究的必要。例如三氯矽甲烷為矽甲烷生產之原料被劃歸為第三類公共危險物品，但對於矽甲烷的分類呢？如果以類推的方式看待這項物質也把它劃歸在第三類的話也無妨，在來看到附錄中對於管制量的描述，最大管制量設在 300 公斤以現在的實況來看除了實驗室的使用量以外，一般產業界的使用者易於超越管制量，一個特別高度風險

且大量使用在國內最重要的產業原料物質卻使用齊頭式平等的管理標準，在面對風險管理的問題上能研討的空間仍然很多。

(二)可燃性高壓氣體儲存場所防護牆設置基準，此為公共危險物品及可燃性高壓氣體設置標準暨安全管理辦法中提到關於防護牆建造設置時應依據的標準，但其防護標準在面對矽甲烷的爆炸威力仍有再研究的空間，例如該基準中提到的工法為依據建築技術規則所訂立，該規則對於構造設計和強度部分乃針對一般混凝土建築設計與建造所製作之準則，對於較嚴苛的防爆需求並無提出足以使人信賴的施工和驗收標準。

例如其中只提到，關於混凝土強度依照 CNS 三〇九〇對於基礎混凝土耐壓強度在  $140 \text{ kgf/cm}^2$  以上而鋼筋混凝土則在  $210 \text{ kgf/cm}^2$  以上，換算為 MPA 單位以後兩者分別為 13.72MPA 和 20.58MPA 而由國防大學提出的研究指出抗爆混凝土強度應該要在 25MPA 才夠，又從抗爆的角度來看如果防護牆強度無法吸收爆炸產生的壓力，爆炸的暴風將會任意擴散造成傷亡，而強度不足的防護牆被爆風擊碎之後將成為破片造成二次傷害。

一座良好的防護牆可以使最嚴重的爆炸災害發生時將高度殺傷的爆炸暴風和破片侷限在特定區域內並將其引導至安全的宣洩區，降低損害，這個問題在未來的確還有探討的空間，即使國防大學提出的數據著實在實際上因為在應用的領域不同；要求的等級也不同但經過實際試驗的結果仍有參考的價值。

(三)各級消防單位處理涉及化學物質災害、工廠災害注意事項，由於只是母法其細節將由子法「公共危險物品及可燃性高壓氣體設置標準暨安全管理辦法」加以管理但是兩者皆並未衍生出對於矽甲烷這類高度危險物品救災、防災時需要參考的詳細技術文件或是指引，而救災單

位目前依賴的救災準則只提到依賴工廠提供的災害搶救文件和 MSDS，在當下安全衛生尚未徹底完全落實在產業界的狀況下，相信不可靠的資訊是相當危險的，而一旦災害產生還要求救災單位開始研讀相關物質資料文件和簡短欠缺詳細及實戰經驗的救災建議實在是緩不濟急，固是否針對特定高風險危險物品另行增訂救災防災標準，在未來確實還有研究的空間。

#### 4.3.2 法規討論

依 4.3.1 法規分析中，討論出：

1. 建議應對自燃性氣體做特別考量，最好有一套標準，可以依據其毒性或自燃特性自動去做管制。
2. 目前法令並無規範室外設置標準，任由業者自行評估應予以整合。故室外場所的儲存安全應有明確的規範。
3. 某些業者氣體原料在國外製造，進口後行灌裝作業，而設施規則第 106 條之「不得任意灌裝或轉裝」，對業界是非常窒礙難行。
4. 設施規則第 185-1 條限流孔(RFO)，實際執行有困難，建議由提供安全管理做法或輔助措施來取代其安裝。
5. 從製造端到消費端整個過程涉及到許多主管機關，建議可以聯合半導體、光電等協會公會一同與主管機關會談討論及整合實施。
6. 有效隔離及安全距離有效縮短(如防火牆防火時效的要求)，為台灣特殊地域性較可行之方式。
7. 上述安全距離的考量問題，建議應先由學界進行相關分析評估，找出一個最好的接受風險答案(合理的安全距離規範)，如此有利於未來業界投資設立時參考依據。



8. 四氫化矽屬毒性氣體，根據規定須要經由除害設備處理不能直接排出，但儲存設備上均有壓力釋放安全裝置(PRD)，一但做動將直接洩放，現況無法導入除害設備內，如何兼顧二者之需求是值得考量的，且在歐洲及美國已對於是否均裝設 PRD 進行討論。
9. 國內容器檢查標準，對於大型高壓氣體有規範可循，但小於 500L 及鋼瓶等則無，建議由主管單位整合訂定之。



## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

矽甲烷氣體為近年來半導體、光電及太陽能產業中十分重要的生產原料。以太陽能產業為例，2008年起全球非晶矽(a-Si)薄膜太陽能產能將大量開出，而非晶矽生產過程即需大量採用矽甲烷氣體。然而矽甲烷氣體具自燃、易爆等危險特性，若運送過程或製程運作時發生防護失效或洩漏等情形，除了可能導致設備損壞、環境污染外，嚴重時可能造成人員傷亡或火災爆炸，是一不可忽視的議題。其中，矽甲烷氣體槽車的安全評估為極其重要的環節，研究結論歸納如下：

- 一、 矽甲烷洩漏的技術數據可用以建立此物質輸送系統安裝及儲存的參考，矽甲烷自燃與否濃度是否超過最低爆炸濃度以及是否低於臨界流速有關，可做為安全設計之考量。
- 二、 如果矽甲烷釋放到局限的空間，矽甲烷立即或延遲或自動點燃的效應如同當大氣立即包圍燃燒物質時潛在嚴重的放熱與膨脹。大氣的膨脹與潛在震波經由點燃物質的傳播可導致鄰近氣源之人員傷害與建物及設備的受損。室外區域使用是減少或消除這些效應的方法。這點可作為槽車置放環境的依據。
- 三、 槽車的安全性應考量，化學物質的包裝和標示、運輸儲槽的裝載和定位、車輛的標示和文件。其中運輸儲槽的裝載和定位包含槽體安全、靜電保護與閥件設計等。

## 5.2 建議

本文之研究建議日後考量矽甲烷氣體槽車安全設計時，可加入以模擬火災危害、反作用力與火焰波和面積模擬等方式，進一步將防護牆高度與鋼瓶閥口安全高度與防護牆距關係計算出。並模擬槽車各部件的防護效果，將可進一步提升矽甲烷氣體槽車的安全性，亦透過火場與灑水降溫之模擬，找出灑水頭的最佳設計位置，同時也可評估其對安全距離縮減之效益分析。

此外噴射反作用力之模擬更可提供氣本體安全固定之最低要求做一探究，從製造端到消費端整個過程涉及到許多主管機關，建議可以聯合半導體、光電等協會公會一同與主管機關會談討論及整合實施。這都對提升國內矽甲烷之作業安全和危害預防有重要之貢獻。

## 參考文獻

- [1]張榮哲，FMEA 應用於降低廠務監控系統運轉風險之探討－以半導體廠氣體化學系統為例，國立交通大學工學院碩士在職專班產業安全與防災組論文，2007。
- [2]謝明宏，四氫化矽危害分析、模擬與安全防護研究報告，行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，民國 98 年 2 月。
- [3]行政院勞工安全衛生研究所，物質安全資料表。  
<http://www.iosh.gov.tw/data/f11/msdsc.htm>
- [4]Cruice, W. J., "Leakage of Silane in Gas Cabinets and Ducts", Hazards Research Corporation, Report # 5038 to IBM, May 11, 1982
- [5]王聖璋，矽甲烷外洩至空氣之引燃特性研究，國立高雄第一科技大學環境與安全衛生工程所碩士論文，民國 97 年 6 月。
- [6]陳政任，高壓矽甲烷外洩之行為及危害研究，國科會工程科技電子報 142 期。
- [7]游原鑑，矽甲烷供氣系統作業人為可靠度評估，國立中央大學環境工程研究所碩士論文，民國 100 年 1 月。
- [8]劉鴻世，曾淑春，黃志強，徐希慶，矽甲烷( $\text{SiH}_4$ )氣瓶櫃操作人為失誤之分析，2003 年。
- [9]Britton, L. G., "Combustion Hazards of Silane and Its Chlorides," Plant/Oper. Prog., 9, 16-35 (1990)。
- [10]王世煌，2002，「工業安全風險評估」，台北，揚智文化。
- [11]Hartman, J. R., J. Famil-Ghiriha, M. A. Ring, and H. E. O'neal, "Stoichiometry and Possible Mechanism of  $\text{SiH}_4\text{-O}_2$  Explosions," Comb. Flame, 68, 43-56 (1987).

- [12]Tamanini, F., J. L. Chaffee, and R. L. Jambor, “Reactivity and Ignition Characteristics of Silane/Air Mixtures,” Process Safety Prog., 17 (1998) 243-258.
- [13]Britton, L. G., “Combustion Hazards of Silane and Its Chlorides,” Plant/Oper. Prog., 9,16-35 (1990).
- [14]矽甲烷氣體外洩 中科友達起火 飄散黃色濃煙，20110917 蘋果日報。  
<http://www.appledaily.com.tw/appledaily/article/headline/20110917/33675010>
- [15]Ignition Characteristics of Releases of 100% Silane, Technology Transfer #96013067A-ENG, SEMATECH Technology Transfer, Austin, TX, March 7, 1996. [www.sematech.org](http://www.sematech.org).
- [16]Ignition Characteristics of Releases of 100% Silane, Technology Transfer #96013067A-ENG, SEMATECH Technology Transfer, Austin, TX, March 7, 1996. [www.sematech.org](http://www.sematech.org).
- [17]邱信明，半導體工廠火災防救管理之探討，國立成功大學工學院管理碩士在職專班碩士論文，民國 95 年 1 月。
- [18]林筱倫，大宗矽甲烷儲存場所防爆特性研究，國立中央大學環境工程研究所碩士論文，民國 98 年 6 月。
- [19]陳玉峰、陳俊勳，火災之營運持續管理系統建置-以某 TFT-LCD 公司為例，友達光電股份有限公司、交通大學工學院。
- [20]徐志華，由平面液晶顯示器設備採購程序強化設備本質安全，國立雲林科技大學環境與安全衛生研究所碩士論文，民國 99 年 6 月。
- [21]王嘉麟、金大仁，運用失效模式與影響分析評估矽甲烷供應系統之安全性—以 TFT-LCD 廠為例，工業安全衛生月刊，2007。
- [22]半導體製造中矽甲烷之大型化供應與其安全測試研究—含美國 CGA 協

會大型供應規模測試結果，半導體科技，2001。

[23]經濟部工業局，98--光電半導體實務手冊完整版，民國 98 年 11 月。

[24]夏瑞郎，科技廠房全生命週期消防安全管理之研究— 以 TFT-LCD 科技廠房為例，國立中央大學營建管理研究所碩士論文，民國 100 年 1 月。

[25]中華壓力容器協會代檢組網頁，[www.pva.org.tw](http://www.pva.org.tw)

